

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
(повна назва інституту/факультету)

КАФЕДРА БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

_____ Владислав ШЛИКОВ
(підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

« ____ » _____ 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Клінічна інженерія»
(назва)

спеціальності 163 «Біомедична інженерія»
(код та назва)

на тему: «Резонанс барабанної перетинки взаємно з слуховим апаратом»

Виконав: студент 4 курсу, групи БМ-62
(шифр групи)

Починок Захар Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник д.т.н. проф. каф. БМІ Лебедєв Олексій Володимирович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Консультант 4 доц. каф. ОППЦБ, к.т.н. Демчук Гліб Вікторович
(номер розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Нормоконтроль ст. викл каф. БМІ Юр'єва Катерина Олександрівна
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Рецензент проф. каф. ББЗЛ, д.т.н., проф. Попадюха Юрій Андрійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет	<u>Біомедичної інженерії</u>
Кафедра	<u>Біомедичної інженерії</u>
Рівень вищої освіти	<u>Перший (бакалаврський)</u>
Спеціальність	<u>163 «Біомедична інженерія»</u>
Освітньо-професійна програма	<u>«Клінічна інженерія»</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

(підпис) Владислав ШЛИКОВ
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Починку Захару Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Резонанс барабанної перетинки взаємно з слуховим апаратом».

керівник роботи: Лебедєв Олексій Володимирович, д.т.н. проф. каф. БМІ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. №1191-с

2. Термін подання студентом роботи: «08» червня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: наукова та технічна література (в електронному вигляді); наукові статті (в електронному вигляді) з даної теми; програмний продукт Solid Works та матеріал з його використання.

4. Зміст роботи: аналіз наукової та технічної літератури; вивчення будови та фізичних характеристик слухового аналізатора людини, а також його захворювань; проектування моделей барабанної перетинки у різних патологічних станах та проведення досліджень резонансу; аналіз отриманих результатів дослідження.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорони праці	Демчук Г.В. доцент кафедри «Охорона праці, промислової та цивільної безпеки»		

7. Дата видачі завдання «13» квітня 2020р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи (проекту)	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел	13.04.2020-03.06.2020	
2.	Вибір програмного продукту для моделювання	18.04.2020-22.04.2020	
3.	Побудова моделей барабанної перетинки	25.04.2020-29.05.2020	
4.	Проведення досліджень резонансу	10.05.2020-01.06.2020	
5.	Аналіз результатів	12.05.2020-01.06.2020	
6.	Оформлення ПЗ	25.05.2020-06.06.2020	
7.	Охорона праці	18.05.2020-05.06.2020	
8.	Отримання рецензії та відгуку	05.06.2020-08.06.2020	
9.	Здача роботи на нормоконтроль	07.06.2020	
10.	Захист дипломної роботи	19.06.2020	

Студент

(підпис)

Захар ПОЧИНОК

(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Олексій ЛЕБЕДЄВ

(Власне ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: «Резонанс барабанної перетинки взаємно з слуховим апаратом».

Обсяг дипломної роботи становить 63 сторінки, міститься 47 ілюстрацій, 13 таблиць. Загалом опрацьовано 25 джерел.

Метою даної роботи є дослідження резонансних параметрів барабанної перетинки у змодельованих патологічних станах та пошук залежності між станом мембрани та резонансними показниками.

Практичне значення полягає у знаходженні певної відповідності між АЧХ та конкретним патологічним станом барабанної перетинки. Отримані результати можуть бути застосовані для розробки приладів для визначення стану барабанної перетинки.

Завдання:

- аналіз особливостей будови слухового аналізатора людини;
- моделювання барабанної перетинки у різних станах;
- проведення аналізу моделей у середовищі Solid Works;
- дослідження резонансних характеристик;
- пошук залежностей.

Основні результати: проаналізована наукова та технічна література, вивчена будова, фізичні характеристики та захворювання слухового аналізатора людини. Спроектвані моделі барабанної перетинки у різних патологічних станах та проведені дослідження резонансу. На базі проаналізованих отриманих результатів дослідження та основі моделювання вдалося встановити характерні ознаки для кожного з розглянутих виглядів патологій, що розглянуті у даній дипломній роботі.

Ключові слова: резонанс, слуховий аналізатор, барабанна перетинка, частота, моделювання, Solid Works.

ABSTRACT

Title "Resonance of the eardrum in conjunction with the hearing aid".

The volume of the explanatory note is 63 pages, contains 47 illustrations, 13 tables. In total, 25 sources have been processed.

The aim of this work is to study the resonant parameters of the tympanic membrane in simulated pathological conditions and to find the relationship between the state of the membrane and resonant parameters.

The practical significance lies in finding a certain correspondence between the frequency response and the specific pathological condition of the eardrum. The obtained results can be used to develop devices for determining the state of the tympanic membrane.

Tasks:

- analysis of the structure of the human auditory analyzer;
- modeling of the eardrum in different states;
- analysis of models in the environment of Solid Works;
- study of resonant characteristics;
- search for dependencies.

Main results: analyzed scientific and technical literature, studied the structure, physical characteristics and diseases of the human auditory analyzer. Models of the tympanic membrane in various pathological conditions were designed and resonance studies were performed. On the basis of the analyzed research results and on the basis of modeling it was possible to establish the characteristic features for each of the considered types of pathologies, which are considered in this thesis.

Key words: resonance, auditory analyzer, eardrum, frequency, simulation, Solid Works.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1 Будова слухового аналізатора людини.....	10
1.1.1 Зовнішнє вухо.....	10
1.1.2 Середнє вухо.....	11
1.1.3 Внутрішнє вухо	13
1.2 Барабанна перетинка вуха людини.....	15
1.2.1 Отоскопія	17
1.3 Механізм сприйняття звуку.....	18
1.4 Явище резонансу	23
1.4.1 Види й приклади резонансу	24
1.5 Порушення стану барабанної перетинки	25
Висновки до розділу 1.....	27
РОЗДІЛ 2 ВИБІР СЕРЕДОВИЩА МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДІВ	
ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Огляд програмних середовищ для моделювання.....	28
2.2 Методи дослідження	29
2.2.1 Частотний аналіз	29
2.2.2 Гармонічний аналіз.....	29
Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА.....	31
3.1 Моделювання барабанної перетинки в нормі.....	31
3.2 Моделювання барабанної перетинки з перфорацією	35
3.2.1 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 4мм.	35
3.2.2 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 6мм	36
3.2.3 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 8мм	38
3.2.4 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 10мм	39

					БМ62.15.2505.1191			
Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата				
Розробив	Починюк З.В.				Резонанс барабанної перетинки взаємно з слуховим апаратом	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Лебедєв О.В.						6	
Реценз.	Попадюха Ю.А.					КІП ім. Ігоря Сікорського ФБМІ БМ-62		
Н. Контр.	Юр'єва К.О.							
Затверд.	Лебедєв О.В.							

3.3	Моделювання барабанної перетинки з рубцями	41
3.3.1	Моделювання барабанної перетинки з рубцем витягнутої форми	41
3.3.2	Моделювання барабанної перетинки з рубцем другого типу.....	42
3.3.3	Моделювання барабанної перетинки з рубцем третього типу	43
3.3.4	Моделювання барабанної перетинки з двома рубцями	44
3.3.5	Моделювання барабанної перетинки з трьома рубцями.....	45
3.4	Моделювання барабанної перетинки зі зміною товщини	47
3.4.1	Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.2мм	47
3.4.2	Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.4мм	48
3.4.3	Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.6мм	49
3.4.4	Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.75мм	50
3.4.5	Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.5мм	51
3.4.6	Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.25мм	52
3.4	Висновок до розділу 3	53
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....		54
4.1	Характеристики об'єкту що проектується.....	54
4.1.1	Характеристики об'єкту.....	54
4.1.2	Складові частини об'єкту.....	55
4.1.3	Характер взаємодії об'єкту в системі «людина – об'єкт»	55
4.2	Оцінка потенційних небезпек що створюються конструкцією об'єкту, який проектується та заходи їх усунення.....	56
4.2.1	Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	56
4.2.2	Небезпека враження людини електричним струмом	57
4.2.3	Біологічні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів...	58
4.3	Розробка «Інструкції по техніці безпеки при експлуатації спроектованого приладу»	59
	Висновок до розділу	59
ВИСНОВКИ.....		60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ		61

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

PDE – Partial Differential Equations (часткові диференціальні рівняння)

ВЧ – високі частоти

НЧ – низькі частоти

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

БП – барабанна перетинка

					БМ62.15.2505.1191	Лист
						8
Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Сьогодні дуже поширеними є проблеми пов'язані з слуховою системою. Причиною зростання кількості людей з порушеннями слуху здебільшого є дія сильних звукових подразників на звуковий аналізатор, через що знижується його збудливість. Проте, слід пам'ятати, що крім безпосередньо разової енергії впливу звуку, існує накопичення енергії пов'язане з явищем резонансу, яке може призвести до розриву барабанної перетинки. Мають місце й випадки, що симптоми не виражені та непомітні пацієнту й у випадку незначних порушень мембрани зниження слуху не спостерігається. У цьому випадку потрібна вчасна та швидка діагностика стану барабанної перетинки лікарем. Отже, є актуальним пошук закономірності зміни резонансних частот в залежності від патологічного стану барабанної перетинки, що може пришвидшити визначення стану барабанної перетинки.

Метою даної роботи є дослідження резонансних параметрів барабанної перетинки у змодельованих патологічних станах та пошук залежності між станом мембрани та резонансними показниками.

Для досягнення мети були поставленні наступні задачі:

- аналіз особливостей будови слухового аналізатора людини;
- моделювання барабанної перетинки у різних станах;
- проведення аналізу моделей у середовищі Solid Works;
- дослідження резонансних характеристик;
- пошук залежностей.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Будова слухового аналізатора людини

Акустичні хвилі звукового діапазону досить сильно розширюють інформаційне сприйняття світу людиною, а також дозволяють орієнтуватись у просторі.

Слуховий аналізатор виконує функцію сприйняття коливань повітряного середовища. Він являє собою акустичну систему з механічних та нервових структур, які сприймають та аналізують звукові коливання й перетворюють їх у звуковий образ.

Людське вухо сформоване з наступних відділів: зовнішнє, середнє та внутрішнє вухо.

1.1.1 Зовнішнє вухо

Зовнішнє вухо (рис.1.1) складається з вушної раковини, слухового проходу та барабанної перетинки [1].

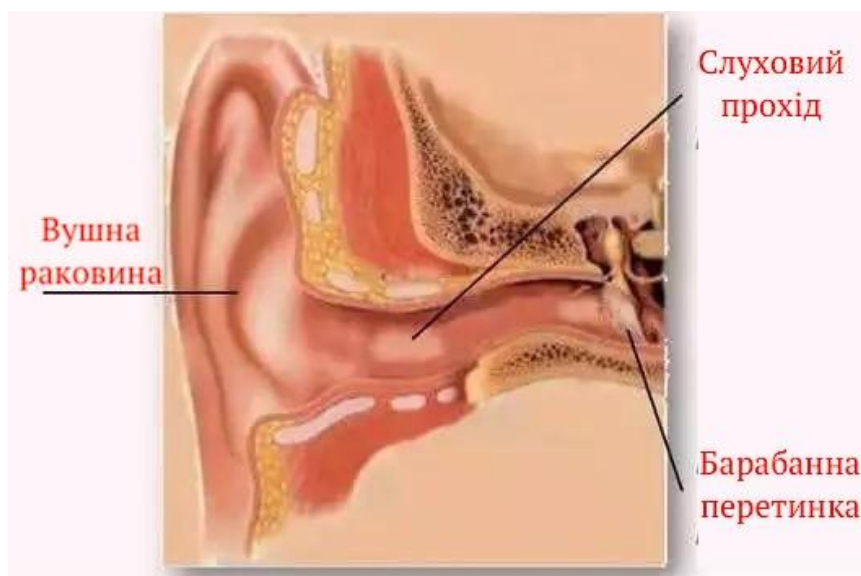


Рисунок 1.1 – Будова зовнішнього вуха [9]

Вушна раковина сформована еластичним хрящем товщиною 0.5-1 мм, який покритий тонким шаром шкіри. Різноманітні виступи поверхні вушної раковини використовують для фіксації слухового апарату при протезуванні.

Головні функції вушної раковини – захист від механічних пошкоджень, вловлює високочастотні звуки (в межах 4000 Гц), визначає звідки надходить звук (спереду чи ззаду) та концентрує енергію.

Зовнішній слуховий прохід має вигляд зігнутої трубки довжиною 2,5 см, еліптичної форми, що має діаметр біля входу рівний 0,7 см, до кінця проходу набуваючи діаметр у вертикальній осі – 0,9 см, яка є продовженням вушної раковини. Тут, як у звуковому резонаторі, який налаштований на частоту 2-3 кГц, відбувається посилення звукового тиску поблизу барабанної перетинки на 8-10 дБ.

На границі між зовнішнім та середнім вухом розташовується барабанна перетинка. Звуковий тиск викликає вібрацію перетинки, на якій його зміна перетворюється у механічні коливання [2].

Зовнішнє вухо виконує наступні важливі функції: уловлення звукових хвиль та направлення їх до слухового проходу, локалізація джерела звуку, проведення звукових хвиль до барабанної перетинки, захист внутрішнього вуха та забезпечення постійної температури системи слухового аналізатора [3].

1.1.2 Середнє вухо

Середнє вухо трансформує коливання барабанної перетинки у механічну енергію, яку передає до внутрішнього вуха та складається з наступних повітроносних порожнин: барабанна порожнина з слуховими кісточками та євстахієва труба (слухова труба) (рис. 1.2).

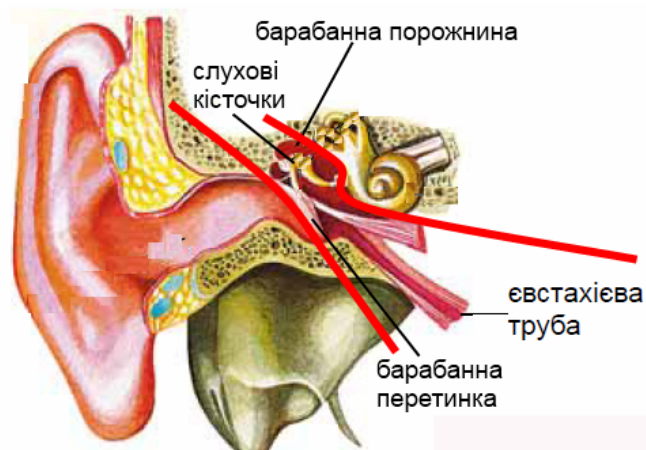


Рисунок 1.2 – будова середнього вуха [9]

Барабанна порожнина має форму неправильної чотирикутної призми об'ємом близько 1 см^3 та має три, з'єднані між собою, слухові кісточки: молоточок, коваделко та стремінце (рис.1.3).

Молоточок вплетений у барабанну перетинку одним кінцем, а другим рухомим з'єднанням з коваделком, яке у свою чергу з'єднане зі стремінцем за допомогою суглоба.

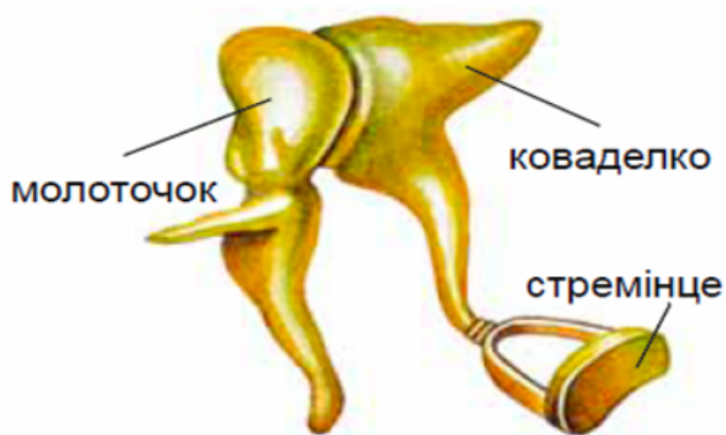


Рисунок 1.3 – Слухові кісточки [9]

Система слухових кісточок виконує функцію передачі коливань барабанної перетинки до перетинки овального вікна (великий діаметр рівний 3-4 мм) збільшуючи тиск звукової хвилі приблизно у 30-40 разів. Проте, у барабанній порожнині наявний м'язовий апарат, який складається з двох м'язів: стремінцевий м'яз та м'яз, що натягує барабанну перетинку. Через їх скорочення напружується барабанна перетинка та зменшується коливальний рух слухових кісточок, що призводить до того, що втрачається 15-20 дБ сили звуку [3].

Найбільша кісточка у даній системі – молоточок, довжина якого 8-9 мм, а маса близько 25 мг. Структура коваделка має: тіло, короткий і довгий відростки. Його маса – близько 30 мг, а довжини на протязі довгого та короткого відростків 7 мм та 5 мм відповідно. Найменшою кісточкою є стремінце, вагою приблизно 3-4 мг, висотою 3,5 мм та шириною 1,4 мм.

Слухова труба з'єднує барабанну порожнину і носоглотку та має довжину 3,5 см й завширшки 2 мм [8]. Основною функцією є підтримання однакового тиску зовні і зсередини на барабанну перетинку. В трубі наявний глотковий отвір, що відкривається під час позіхання, ковтання, чхання, внаслідок чого повітря потрапляє у барабанну порожнину.

Основною функцією середнього вуха є вирівнювання імпедансів – тиску, який створює середовище на проходження через нього звукових хвиль. Середнє вухо перетворює імпеданс повітряного середовища в імпеданс водного середовища які розділені перетинкою овального вікна [4].

1.1.3 Внутрішнє вухо

Внутрішнє вухо знаходиться зразу після овального вікна та в глибині скроневої кістки черепа перед круглим вікном середнього вуха (рис. 1.4). Являє собою кістковий лабіринт всередині якого знаходиться перетинчастий лабіринт зі сполучної тканини, що повторює форму кісткового. У щілині між лабіринтами наявна рідина – перилімфа, а всередині перетинчастого лабіринту – ендолімфа. Складається з системи порожнин та каналів, заповнених рідиною таких як: присінок, завитка та півколові канали.

Коливання які надходять від середнього вуха передаються рідині, що наповнює завитку, через кругле вікно яке знаходиться у стінці, яка відділяє середнє вухо від внутрішнього.



Рисунок 1.4 - Внутрішнє вухо [9]

Завитка – основна частина органу слуху. Структура становить собою звернуту у 2,5 витки трубку діаметром біля основи 7-9 мм, а на вершині 5 мм, схожу на равлика, що звужується до вершини, до якої направлені усі канали вестибулярного апарату у виді трьох кілець. Всередині завитки знаходиться дві мембрани: нижня (базальна) – утворена щільною сполучною тканиною, а верхня – з одного шару сполучної тканини. Мембрани ділять завитку на три відділи: верхній, середній та нижній [5].

На базальній мембрані розташований кортіїв орган – рецепторний апарат слухового аналізатора, у якому сконцентровані особливі сенсорно-епітеліальні волоскові клітини, які через коливання перилімфи сприймають слухові подразнення, перетворюють їх на електричну енергію нервових імпульсів тієї ж частоти та передають на відростки присінково-завиткового нерва.

Присінок знаходиться між барабанною порожниною та внутрішнім слуховим проходом, представляє собою порожнину овальної форми і складається з двох перетинчастих мішечків: переднього (круглого) і заднього (овального). Передній з'єднаний з завитком, задній – з півколовими каналами. На зовнішній частині присінку зі сторони барабанної порожнини, розташоване овальне вікно, яке прикрите підніжкою стремінця, і кругле вікно, закрите вторинною барабанною перетинкою [4].

Існує три півколових канали у вигляді дугоподібних трубок: верхній, задній і зовнішній. Кожен канал з одного кінця гладкий, а з іншого розширений (ампула). Присінок разом з півколовими каналами формують вестибулярний апарат і є периферичним відділом органу рівноваги. У присінку і півколових каналах знаходиться рецептор вестибулярного апарата з особливих нервових клітин. У мішечках цей рецептор називається отолітовим апаратом, нервові клітини якого прикриті перетинкою з кристалами – отолітами. У півколових каналах рецептор складається з волоскових нервових клітин, які утворюють в ампулі кожного з каналів особливий гребінець. Прямолінійні рухи призводять до зміщення отолітів у мішечках присінку, а обертальні рухи – до переміщення ендолімфи в півколових каналах, на що реагують волоскові клітини в ампулярних гребінцях [5]. У відповідь виникають рефлекторні реакції, які спрямовані на збереження рівноваги.

1.2 Барабанна перетинка вуха людини

Барабанна перетинка (рис. 1.5) – міцна, напівпрозора пластина, товщиною 0,074 см, еліптичної форми з діаметром по вертикалі 0,9-1,0 см і по горизонталі – 0,8-0,9 см у дорослої людини [8]. БП розташована похило і починає коливатися, коли на неї падають з боку зовнішнього слухового ходу звукові коливання, а оскільки вона не має власного періоду коливань, то коливається при будь-якому звукові відповідно до його довжини хвилі [2].

Існують значні індивідуальні особливості у нахлоні та будові барабанної перетинки відносно вертикальної осі. Кут між верхньою частиною барабанної перетинки та стінкою слухового проходу приблизно 140° , а між нижньою частиною та стінкою слухового проходу – близько 27° .

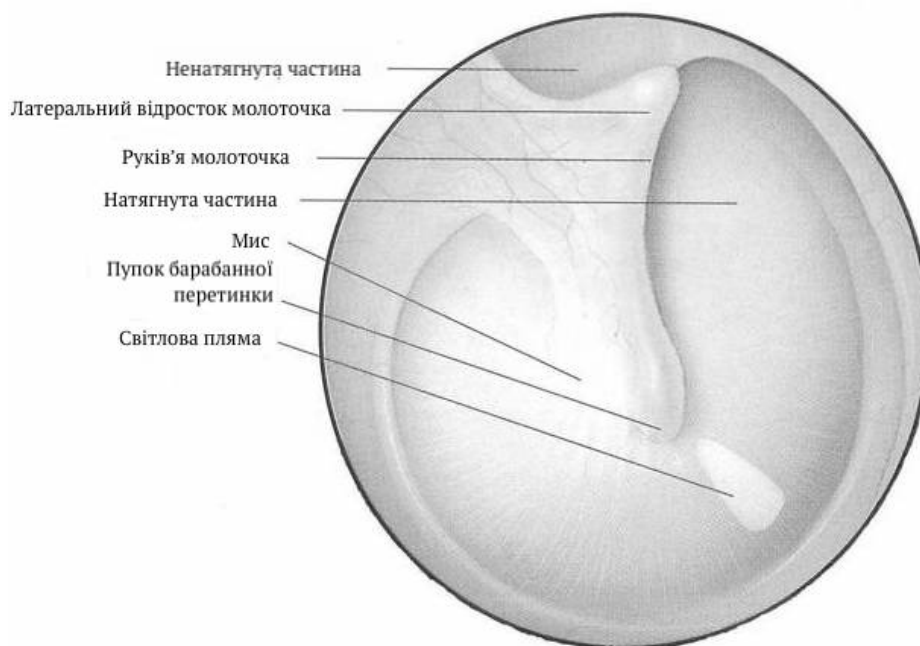


Рисунок 1.5 – Барабанна перетинка [11]

У склад мембрани входять такі тканини:

- внутрішнє покриття сформоване слизовою оболонкою барабанної порожнини;
- основне покриття складається з радіальних та циркулярних фіброзних волокон;
- зовнішнє покриття сформоване епідермісом слухового проходу.

Потовщення барабанної перетинки прикріплено до кільця скроневої кістки, саме ця частина мембрани є натянутою. Верхня частина зафіксована кістковою врізкою та розміщена достатньо вільно. Дві частини БП розмежовані молоточковими складками: передньою та задньою.

Короткий відросток молоточка кріпиться зі сторони барабанної перетинки безпосередньо до мембрани, що дозволяє йому вловлювати коливання в мембрані, коли відбувається вібрація барабанної перетинки.

Всередині середнього вуха підтримується тиск на барабанну перетинку рівний атмосферному, тому при впливі повітряного потоку на мембрану, вона прогинається та передає імпульс на молоточок.

Завдяки резонансу черепа, людина може сприймати низькочастотні звуки до 220 кГц. Спроможність чути визначається балансом між зовнішнім та

внутрішнім тиском. Якщо збалансований тиск на барабанну перетинку раптово порушується, то може статись травма мембрани.

Часто при вибухах, характерних раптовою та потужною ударною хвилею, люди втрачають слух внаслідок розриву барабанної перетинки.

Для нанесення такої складної травми потрібен дуже сильний вибух, бо барабанна перетинка дуже міцна і витримує тиск на 100 мм рт. ст. більше ніж зазвичай.

В легких випадках через деякий час слух відновлюється самостійно, але у тяжких, коли пошкоджений основний шар мембрани, для відновлення слуху потрібна пластика барабанної перетинки.

1.2.1 Отоскопія

Отоскопія – це базовий метод діагностики слухового проходу та барабанної перетинки за допомогою спеціального пристрою. Він проводиться шляхом розміщення у слуховому проході пацієнта спеціальної воронки. При цьому вушна раковина зміщується назад і вгору.

Здорова мембрана є напівпрозорою, з перламутровим відблиском, також через перетинку проглядається короткий відросток молоточка (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Фото барабанної перетинки у нормі [13]

Також є додаткові способи діагностики барабанної перетинки:

- аудіометрія – визначає слухову чутливість до звукових хвиль різної частоти. Прилад з яким роблять точне дослідження називається аудіометр. Дозволяє дослідити як кісткову, так і повітряну провідність;

- камертонне дослідження – при відсутності аудіометра, аудіометрія проводиться двома камертонами.

Зовнішній вигляд БП є дуже важливим діагностичним критерієм, завдяки якому можна судити про стан внутрішнього вуха та його органів.

1.3 Механізм сприйняття звуку

Слуховий аналізатор людини має властивості частотного аналізу, дискретного сприйняття по частотному діапазону. Отже, аналоговий звуковий сигнал являє собою послідовність електричних імпульсів, що утворюються нервовими кінцями волокон основної мембрани людського вуха [1].

Вушна раковина в області зовнішнього вуха направляє акустичні коливання в слуховий прохід, що закінчується барабанною перетинкою. В слуховому проході, як у звуковому резонаторі, проходить приблизно трикратне посилення звукового тиску, що потім має вплив на барабанну перетинку. Барабанна перетинка є межею між середнім вухом та зовнішнім і з'єднана з кістково-м'язовим механізмом, який складається з молоточка, коваделка та стремінця. М'язова тканина ніжки коваделка спирається на мембрану овального вікна внутрішнього вуха. Система кісточок молоточок-коваделко-стремінце є акустичним трансформатором коливань барабанної перетинки, що збільшує звуковий тиск на мембрані овального вікна для найефективнішої передачі енергії з повітряного середовища середнього вуха у внутрішнє вухо, яке заповнене рідиною – лімфою.

Коли відбуваються коливання мембрани овального вікна внутрішнього вуха в рідині внутрішнього вуха виникають пружні коливання, що проходять вздовж основної мембрани від основи до вершини.

Структура основної мембрани така ж як у системи акустичних резонаторів зі змінною резонансною частотою. На рис 1.7 представлена розгортка основної мембрани на якій вказана шкала резонансних частот відповідних точок.

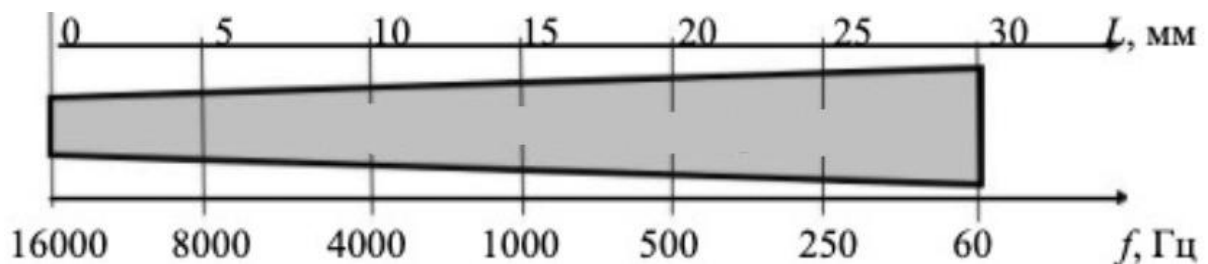


Рисунок 1.7 – Резонансні зони на розгортці кортієвого органа [1]

Ділянки основної мембрани, що розміщені поблизу основи равлика резонують на високочастотні складові спектру звукового сигналу, що призводить до їх коливання. Середня частина реагує на середні частоти звукового діапазону, а ділянки поблизу вершини – на низькі частоти.

Резонансні явища в основній мембрані породжують реакцію нервових волосків на основній мембрані, яких налічується близько двадцяти п'яти тисяч. Електричний сигнал від нервових волосків поступає в головний мозок, завдяки чому людина сприймає звукові коливання певної частоти. Завдяки резонансним зонам основної мембрани людина може сприймати декілька звукових частот одночасно.

Орган слуху людини реагує лише на таку звукову хвилю, частота коливань якої лежить в діапазоні від 16 Гц до 20 кГц [1].

В залежності від віку звук сприймається на різних частотах. У дітей сприйняття звуку проходить на частоті до 22 кГц, у дорослих – до 16-18 кГц, а у людей похилого віку максимальна частота сприйняття вже 11-12 кГц.

Інтенсивність звукової хвилі (сила звуку) лежить в межах від порогу чутності – мінімального значення інтенсивності звукової хвилі при якому вона сприймається слуховим аналізатором та порогом болю – максимальним значенням інтенсивності.

При частоті 1 кГц поріг чутності у людей з нормальним слухом приблизно 10^{-12} Вт/м², а поріг болю рівний 10 Вт/м². На рис. 1.8 надана усереднена діаграма слухового діапазону людини. Нижня крива – поріг чутності, верхня крива – поріг болю. Область чутності знаходиться між цими двома кривими.

Вухо людини сприймає звукові коливання за гучністю, висотою тону та тембром, що характеризуються інтенсивністю, частотою та акустичним спектром.

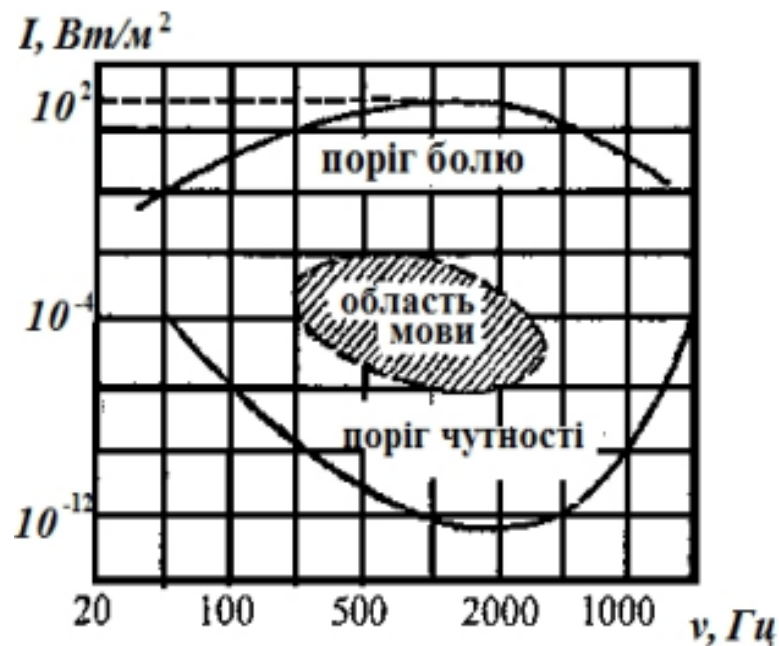


Рисунок 1.8 – Діаграма слухового діапазону [1]

Гучність звуку визначає рівень слухового відчуття та найбільш зв'язана з інтенсивністю звуку. Рівень гучності вимірюється у Белах (в СІ) та у фонах (позасистемна одиниця). Фон чисельно рівний рівню звукового тиску у дБ для чистого тону з частотою 1000 Гц. На рис. 1.9 приведені криві рівної гучності, які використовуються для порівняння гучності й рівня інтенсивності звуку на різних частотах.

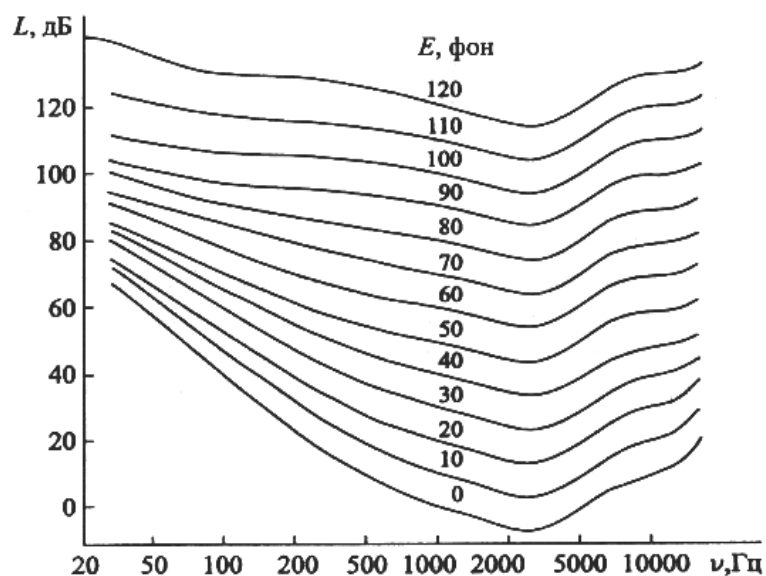


Рисунок 1.9 – Криві рівної гучності [2]

Висота тону – якість звуку, що сприймається. Чистий тон утворюється завдяки гармонічним коливанням певної звукової частоти. Частота тону є об'єктивною характеристикою звуку, яка не залежить від особливостей органів слуху людини, проте висота тону являється суб'єктивною характеристикою, тобто звук з однією і тією ж частотою буде сприйматися різними людьми по різному.

Діаграму з розподілом інтенсивності по частотах основного тону називають акустичним спектром. Спектр тонів є лінійчастим, у простого тону він представлений однією вертикальною лінією (рис.1.10 (а)), а у складного це сукупність декількох вертикальних ліній (рис. 1.10 (б)).

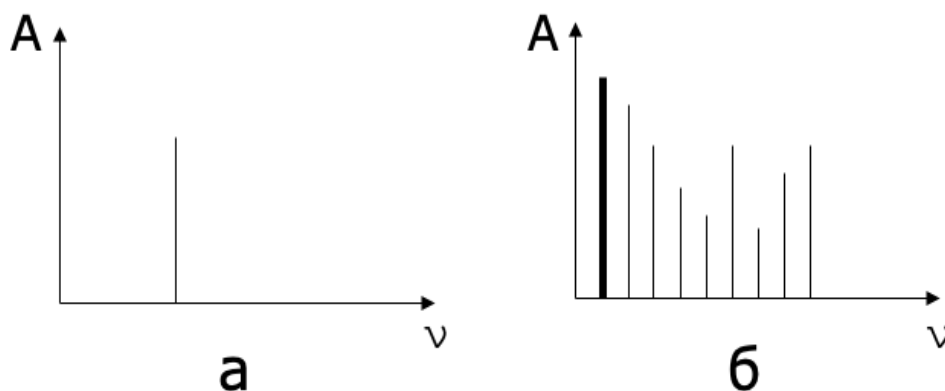


Рисунок 1.10 – Акустичні спектри простого (а) та складного (б) тонів

Негармонічний звук у якого інтенсивність коливань хаотично змінюється з часом, на відміну від простих тональних звуків, називається шумом. Акустичний спектр шуму – суцільний (рис. 1.11).

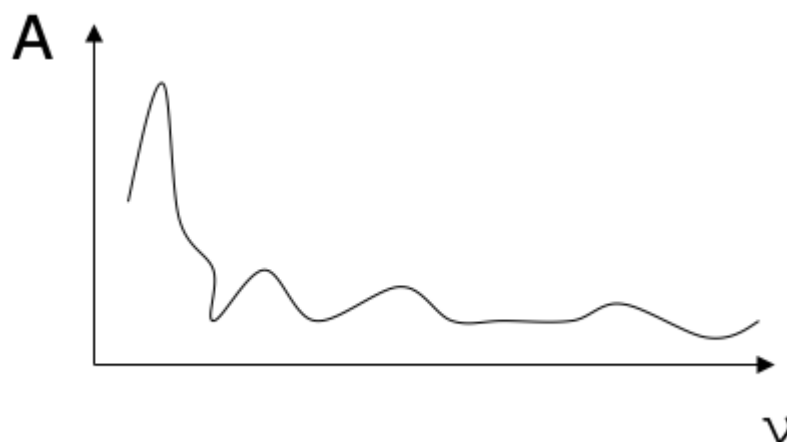


Рисунок 1.11 – Акустичний спектр шуму

У Таблиці 1.1 приведені основні характеристики різних видів звуку, які ми сприймаємо щодня.

Таблиця 1.1 – Характеристики різних видів звуку

Приблизний характер звуку	Інтенсивність звуку (Вт/м ²)	Звуковий тиск (Па)	Рівень інтенсивності (дБ)
Поріг чутності	10 ⁻¹²	0,00002	0
Шепіт	10 ⁻¹⁰	0,0002	20
Розмова нормальним голосом	10 ⁻⁷	0,0064	50
Розмова гучним голосом	10 ⁻⁶	0,02	60
Шум на вулиці	10 ⁻⁵	0,64	80
Крик	10 ⁻⁴	0,2	80
Поріг болю	10	64	130

Спостерігається, що постійний вплив на слуховий аналізатор шуму на вулиці, крику та інших видів звуку, з рівнем інтенсивності більш ніж 80 дБ, буде призводити до послаблення чутливості слуху.

1.4 Явище резонансу

Резонанс – явище різкого зростання амплітуди вимушених коливань, яке настає при наближенні частоти зовнішнього впливу до деяких значень (резонансних частот), що визначаються властивостями системи. Збільшення амплітуди – це лише наслідок резонансу, а причина – збіг зовнішньої (збудливої) частоти з внутрішньою (власною) частотою коливальної системи. За допомогою явища резонансу можна виділити і / або посилити навіть дуже слабкі періодичні коливання. Резонанс – явище, яке полягає в тому, що при деякій частоті змушені сили коливальної системи виявляється особливо чуйними до дії цієї сили [14].

Резонанс у фізиці часто пов'язаний з добротністю. Під добротністю розуміється параметр коливальної системи, що визначає ширину резонансу і характеризує, у скільки разів запаси енергії в системі більше, ніж втрати енергії за час зміни фази на 1 радіан. Позначається символом Q .

Загальна формула добротності будь-якої коливальної системи розраховується за формулою (1.1):

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot W}{P_d} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot W}{P_d}, \quad (1.1)$$

де:

ω_0 – резонансна циклічна частота коливань;

f_0 – резонансна частота коливань;

W – енергія, що запасена в коливальній системі;

P_d – потужність, що розсіюється системою.

Різні показники добротності призводять до різних наслідків:

За низького ступеня добротності коливальна система не буде зберігати вимушені коливання продовж тривалого часу, а дуже скоро повернеться до природних коливань.

Висока добротність у певних ситуаціях може бути небезпечною, оскільки сильний резонанс і багаторазове збільшення амплітуди коливань може призвести до руйнування фізичного тіла [15].

1.4.1 Види й приклади резонансу

Серед резонансів у фізиці розрізняють такі види резонансу як:

Механічний резонанс – резонанс викликаний механічними діями, тобто коливання викликані накопиченням амплітуд періодичної зміни взаємного положення часток під дією зовнішнього збудження. Прикладами механічного резонансу є резонанс моста від проходу роти солдат, резонанс дзвону, гойдалки і т.д.

Акустичний резонанс – частковий випадок механічного резонансу, що проявляє себе також у збуренні мас середовища довкола тіла, що резонує, що лежить в діапазоні частот близьких до діапазону, що сприймає людина в якості звуку (20 Гц - 20 кГц). Це резонанс, завдяки якому працюють всі струнні музичні інструменти: гітара, скрипка, лютня, балалайка, банджо і т.д. До речі, корпус музичних інструментів не дарма має свою форму. Звук, що видається струною при збудженні, потрапляє всередину корпусу і там вступає в резонанс зі стінками, що в результаті призводить до його посилення. З цієї причини якість звучання, наприклад, гітари сильно залежить від форми, а також того матеріалу, з якого вона зроблена і навіть від лаку яким вона покрита [15].

Електричний резонанс – є збіг частоти коливань зовнішньої напруги з частотою коливань електричного кола, по якій йде струм.

В даній роботі мова йде про коливання барабанної перетинки, тобто про механічні, а не електричні.

1.5 Порухення стану барабанної перетинки

Беручи до уваги попередні підpunkти стає зрозуміло, що БП є одним з найважливіших елементів в процесі сприйняття звукових сигналів навколишнього середовища. В результаті патологічних процесів мембрана не може нормально функціонувати. В результаті починається виділення гною, розвиваються запальні процеси, через що вуха болять та "стріляють".

Найпоширенішою травмою барабанної перетинки є порушення її цілісності, яке може статись по наступним причинам:

- Механічний вплив (зокрема необережне користування гострими предметами, олівцями, ручками, скріпками з ціллю почистити вухо від вушної сірки);
- Фізичні фактори (баротравма, термічні опіки);
- Хімічні фактори (хімічні опіки);
- Запальний процес середнього вуха.

Основними симптомами перформації перетинки є: різкий біль, рідкі виділення або вушні кровотечі, раптова втрата слуху, закупорювання вуха. Їх виразність залежить від ступеня пошкодження БП.

Наслідки наявності отвору у мембрані можуть бути наступні:

- Потрапляння, через отвір барабанної перетинки, інфекції, що може закінчитись отитом;
- Проникнення грибкових інфекцій, які є причиною розвитку отомікозу;
- Порушення звукової чутливості через різке зниження слуху.

При впливі малої сили на перетинку, спостерігається повнокровність її судин; при більш інтенсивному – судини розриваються, утворюючи кровотечу; при максимальній силі – барабанна перетинка рветься по всій своїй протяжності.

Запальний процес у середньому вусі також може стати причиною порушення цілісності перетинки. При отиті прохід євстахієвої труби різко порушується, внаслідок чого рідина, що утворюється внаслідок отиту не має

					БМ62.15.2505.1191	Лист
Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		25

шляху відтоку. Оскільки, барабанна порожнина достатньо мала у розмірах, то навіть невеликий об'єм рідини буде досить сильно тиснути на перетинку. На рисунку 1.12 зображено тиск гною на барабанну перетинку зі сторони середнього вуха.



Рисунок 1.12 – Гнійний отит [18]

Виділяють два основних методи лікування травм барабанної перетинки: медикаментозний та хірургічний.

Перший спосіб передбачає прикладання паперової латки на невелику пошкоджену частину перетинки. Через декілька днів латку потрібно замінити на нову. Таких процедур потрібно провести 3-4 рази до повного одужання.

Хірургічний метод застосовується, якщо медикаментозний спосіб не допоміг, або розрив був занадто великим. Реконструкція барабанної перетинки називається мірінгопластикою. Лікар робить глибокий надріз за вухом пацієнта, з якого береться шматочок тканини і саме його пришиває до місця розриву. Після операцій у вусі повинен знаходитись тампон промочений антибіотиком, який дозволяє уникнути інфекції.

Якщо пошкодження були здобуті внаслідок гнійного отиту, то пацієнту може бути назначений пневмомасаж барабанної перетинки.

Зміною низького та високого тиску утворюється вакуумний вплив на перетинку, внаслідок чого вона стимулюється до коливань, які допомагають вивільнитись від гнійних накопичень і зменшити симптоми отиту.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено детальний аналіз складових слухового аналізатора людини. Знайдені фізичні параметри барабанної перетинки будуть використані для побудови 3D-моделі у Solid Works.

Для більш оперативного аналізу результатів було детально розглянуто поняття резонансу у слуховій системі, його характеристики та види.

Виділено захворювання БП, її геометричні та фізичні характеристики при патологічних станах, які будуть використовуватись при її моделюванні у різних станах.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР СЕРЕДОВИЩА МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Огляд програмних середовищ для моделювання

У даному розділі вирішено розглянути дві найактуальніші програми для моделювання: COMSOL Multiphysics та SolidWorks [17-18].

COMSOL Multiphysics – це платформа моделювання, яка охоплює всі кроки в робочому процесі моделювання – від визначення геометрії, властивостей матеріалу та фізики, які описують конкретні явища для рішення та моделювання після обробки для отримання точних та надійних результатів. Моделювання з COMSOL Multiphysics означає можливість переміщення між моделями електромагнетизму, структурної механіки, акустики, потоком рідини, теплопередачі та явищ хімічних реакцій або будь-якою іншою фізикою, моделлю якої є система PDE, в одному програмному середовищі. Також можливе об'єднання фізичних явищ з цих областей в єдину модель [10].

Проте COMSOL Multiphysics має вагомі недоліки у вигляді складного освоєння інтерфейсу та відсутності літератури по застосуванню українською/російською мовою.

Програмне забезпечення SolidWorks для 3d-моделювання і візуалізації дає можливість створити масштабні моделі. Інструменти програмного продукту надають можливість аналізувати модель для передачі інформації про інші типи модифікацій, використовувати декілька (до 6) матеріалів на одному об'єкті.

Чимало програмних продуктів дають можливість симулювати різного роду фізичні процеси. Моделювання механічного процесу потребує об'єднання як мінімум двох фізичних модулів: дослідження руху та дослідження навантажень. Необхідність реалізації мультифізичних процесів зменшує вибір програмних продуктів, в яких це можливо. Тому наш вибір зупиняється саме на цьому програмному продукті. У роботі буде застосоване програмне забезпечення

SolidWorks Simulation для дослідження резонансних частот та форм коливань БП.

2.2 Методи дослідження

2.2.1 Частотний аналіз

Частотний аналіз в SolidWorks Simulation дозволяє зробити розрахунок резонансів в системі, що допоможе нам визначити найслабшу область барабанної перетинки.

Тіло, що виведене зі стану спокою починає коливатись на певних частотах, так званих власних чи резонансних. При кожній власній частоті тіло приймає певну форму, яка називається формою коливань. При частотному аналізі розраховуються власні частоти та асоціативні форми коливань[18].

Були застосовані наступні можливості режиму частотного аналізу: розрахунок власної частоти моделі, візуалізація вузлів коливань для кожної частоти (моди), враховувались параметри кожного елемента моделі.

Частотний аналіз допоможе нам побачити як потрібно уникати резонансу, шляхом розрахунку резонансних частот і надає данні для вирішення задач по динамічним реакціям [19].

2.2.2 Гармонічний аналіз

При гармонічному аналізі оцінюється напружено-деформований стан конструкції при вимушених коливаннях, котрі збуджуються зовнішніми періодичними силами. Особливо небезпечними є резонансні коливання, які виникають при рівності власної частоти конструкції та частоти зовнішніх сил.

Проведення цього аналізу визначає навантаження в якості функції частоти та обчислює максимальну реакцію на різних робочих частотах.

Результати отримуються у досить зручній формі графіка, який можна швидко аналізувати.

Висновки до розділу 2

У даному розділі розглянуті програмні середовища для моделювання: COMSOL Multiphysics та SolidWorks. В силу зрозумілого інтерфейсу, наявності детальних навчальних матеріалів та великого вибору аналізів було обране програмне забезпечення SolidWorks.

Для дослідження резонансних характеристик барабанної перетинки будуть застосовуватись частотний та гармонічний аналіз.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Моделювання барабанної перетинки в нормі.

Для початку було прийнято рішення зробити аналіз випадку норми, як еталон для порівняння різного роду патологій. Нормальний стан барабанної перетинки представлений на рисунку 3.1.

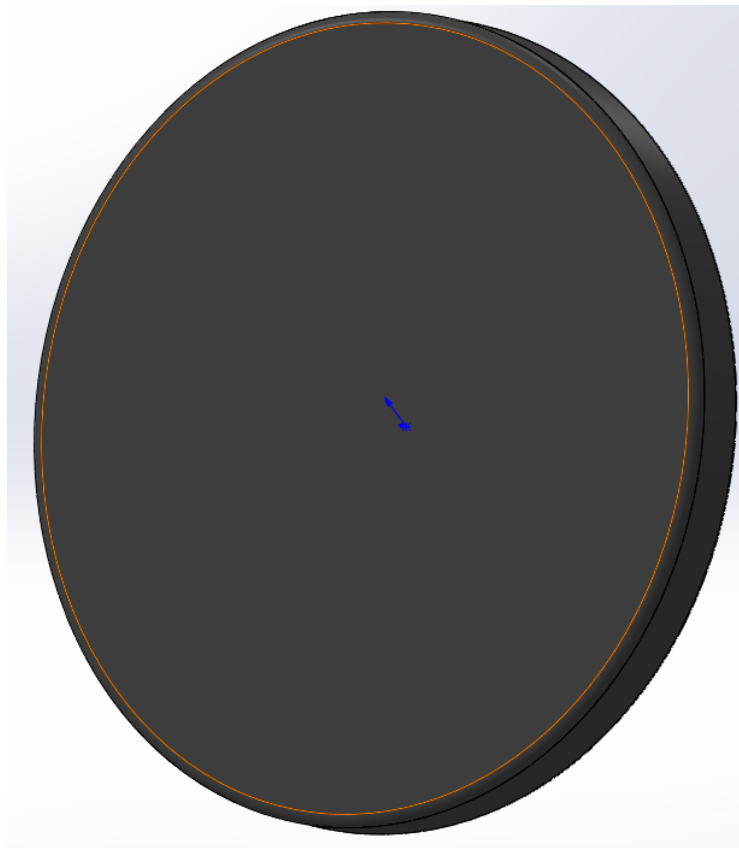


Рисунок 3.1 – Модель барабанної перетинки

Для проведення попереднього дослідження використано частотний аналіз. Частотний аналіз дозволяє знайти резонансні частоти твердого тіла. З резонансних частот було виділено основні моди, що будемо шукати в АЧХ при подальшому дослідженні.

Результатом виконання частотного аналізу став такий набір резонансних частот (табл.3.1):

					ВМ62.15.2505.1191	Лист
						31
Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Резонансні частоти моделі барабанної перетинки

Режим No.	Частота	Масова частка
1	1658	0,3947
2	3357	0,00034247
3	3385	0,0013661
4	5134	0,00015824
5	5296	0,006643
6	5968	0,12963
7	7088	0,000051286
8	7327	0,0020212
9	8168	0,000457147
10	8415	0,00019472
11	8814	0,00000509
12	8941	0,00004294
13	9225	7,1343E-06
14	9595	0,00025958
15	10165	5,04242E-05
16	11009	0,00038015
17	11366	0,0012185
18	11423	0,015402
19	11903	0,01375
20	12013	0,013751
21	12277	0,03415
22	12607	0,0021357
23	13117	0,000044167
24	14075	0,00021136
25	14167	7,4817E-07
26	14238	0,0001453
27	14496	0,000028429
28	14537	0,00099934
29	14929	0,00017424
30	15004	1,6139E-06
31	15213	0,000013073
32	15293	0,000018475
33	15992	0,000001584
34	16972	0,0003913
35	17003	0,00015406

У таблиці 3.1 показник масової частки повідомляє, які режими мають найбільші амплітуди резонансних коливань і скільки частот необхідно щоб точно захопити весь динамічний відгук конструкції. По факту, масова частка є показником, який показує відношення площі під даною частотою до площі на всьому діапазоні частот.

Використаємо даний показник для знаходження основних мод коливань. Для цього об'єднаємо сусідні частоти (в рамках 1 кГц) в один чарунок, а потім обираємо п'ять найбільших сум та розташовуємо в порядку зростання частот. В результаті такої процедури було виділено такі моди:

- 1 мода – 1,5 кГц (0,3947);
- 2 мода – 3,3 кГц (0,0017);
- 3 мода – 5,6 кГц (0,1364);
- 4 мода – 11,6 кГц (0,0786);
- 5 мода – 19,5 кГц (0,0306).

Для проведення частотного аналізу системи та побудови АЧХ був використаний модуль досліджень simulation. Обраний метод дослідження – дослідження лінійної динаміки, тип – гармонічний аналіз. Для дослідження системи обрали діапазон частот 0 Гц – 35 кГц, що показано на рисунку 3.2.

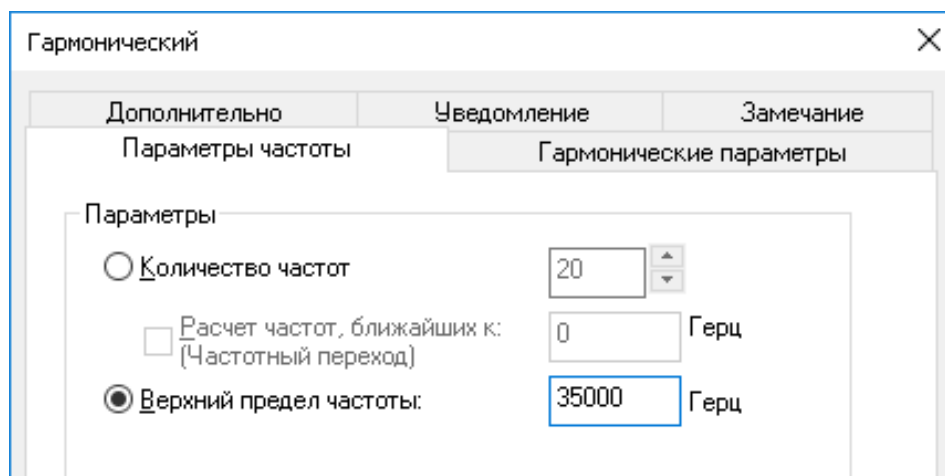


Рисунок 3.2 – Задання меж аналізу

Коефіцієнт демпфування був заданий на рівні 0,05 одиниць для всього діапазону частот. В якості збудження на поверхню мембрани було подано прискорення 1м/с^2 перпендикулярно до її найбільшої площини. Таке збудження виступає в якості вхідного сигналу, на основі якого робиться дослідження реакцій мембрани на вхідну дію різної частоти. На рисунку 3.3 зображено задання вищезгаданих параметрів.

Возбуждение однородного основания

Сообщение
Возбуждение будет ограничено по всем направлениям, ограниченным в определенных направлениях.

Тип
☐ Перемещение
☐ Скорость
☒ Ускорение
☒ Гравитация

Ускорение
 m/s²
 0 m/s²
 0 m/s²
 1 m/s²
☐ Реверс направления

Угол фазы
 deg
 0

Именование частоты
☒ Линейный
☐ Кривая
 Имя... Вид

Настройки обозначения

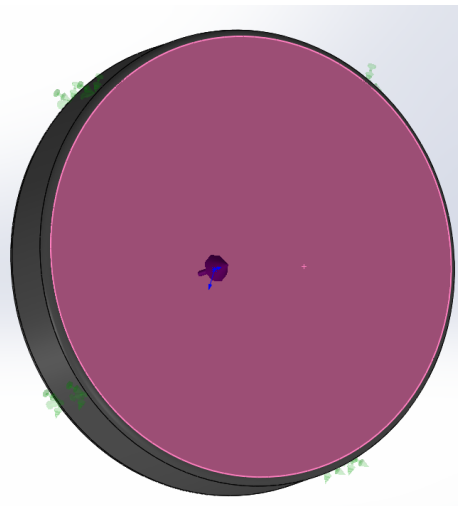


Рисунок 3.3 – Задання параметрів вхідного навантаження для дослідження

В результаті для однієї з точок, розташованих в центрі барабанної перетинки маємо графік відклику на вхідну дію по напрямку вздовж дії вхідного навантаження (рис. 3.4).

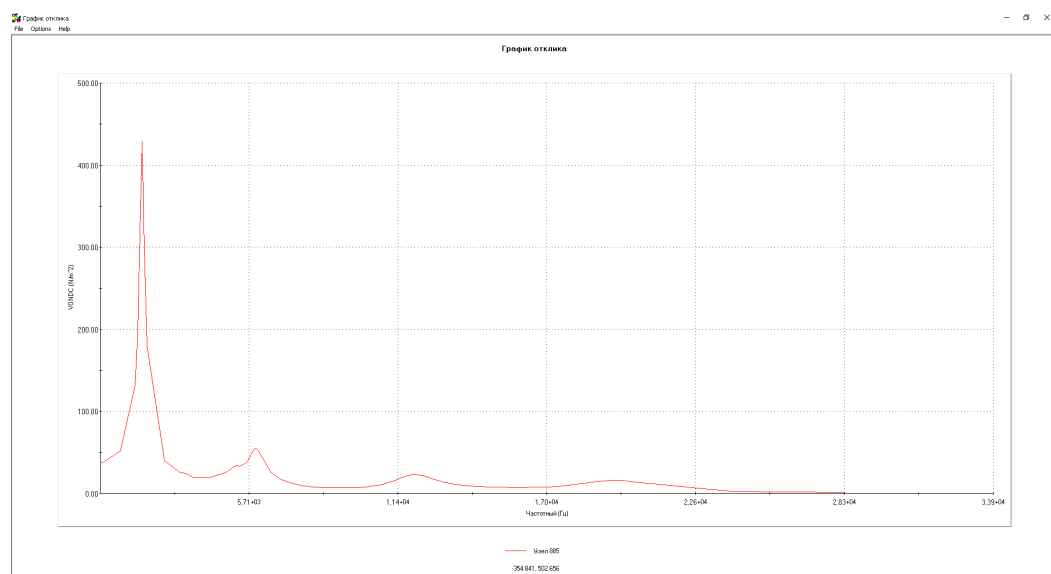


Рисунок 3.4 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Можемо бачити, що система має декілька мод частот: на частотах 1658Гц (1 мода), 5968Гц (3 мода), 12011 Гц (4 мода), 19584 Гц (5 мода). Отже, при нормальному стані перетинки можемо розрізнити всі моди, крім 2-ї.

Що стосується амплітуд, можна бачити, що перший пік знаходиться на рівні 430 Н/м^2 , другого – на рівні 58 Н/м^2 , далі йдуть рівні 28 Н/м^2 та 22 Н/м^2 .

Слід зазначити, що абсолютне значення параметру амплітуди в даному дослідженні має меншу роль, а досліджуються більше морфологічні особливості кривої. Зміна амплітуди від ситуації до ситуації пояснюється тим, що вимірювання АЧХ ведеться на одній точці у всіх випадках, проте сама точка в залежності від конфігурації сітки іноді потрапляє на пучності стоячої хвилі при резонансі, а іноді – ні.

3.2 Моделювання барабанної перетинки з перфорацією

3.2.1 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 4мм.

Для наступного досліді обрано модель патології, що являє собою преформацію, тобто наявність отвору барабанної перетинки. Перше дослідження проводилося на моделі перфорації діаметром 4мм (рис. 3.5).

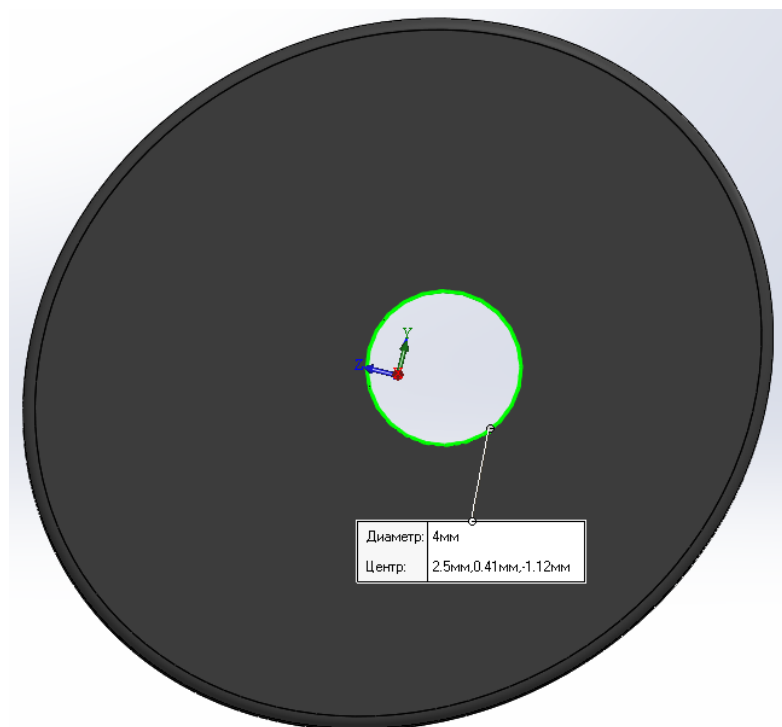


Рисунок 3.5 – Модель перфаророваної перетинки. Розмір отвору 4 мм

На рис. 3.6 постерігаємо, що загальна форма АЧХ збереглась, хоча з'явилися деякі відмінності: форма стала більш різкою, місцями з'явилось більше впадин та горбів. Наприклад, можна помітити впадину на частоті близькій до 3350 Гц та близькій до 9100 Гц.

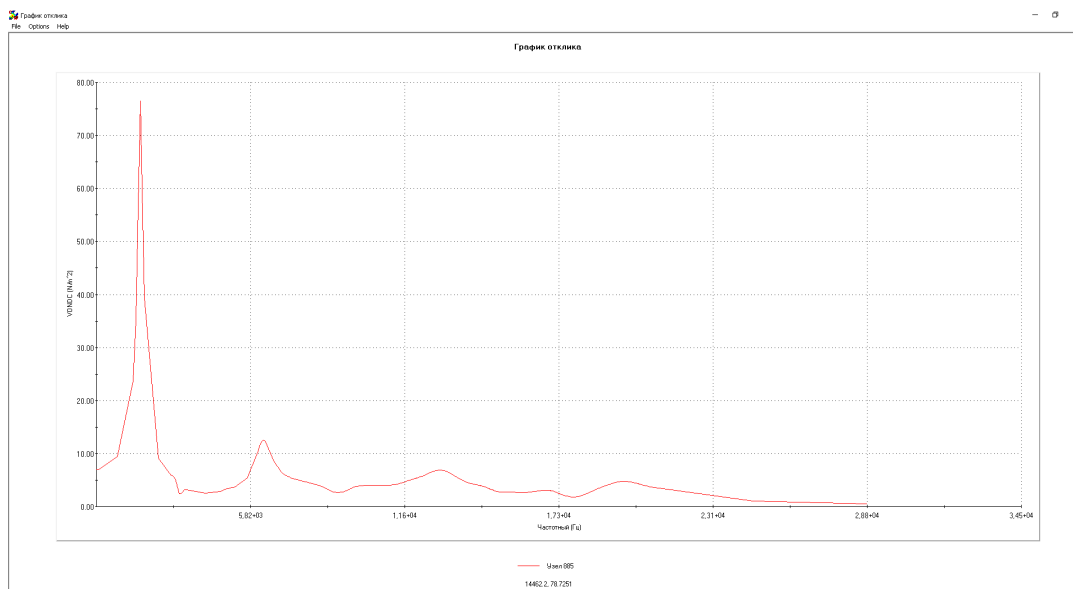


Рисунок 3.6 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Частоти основних піків змістились. Система перфорованого вуха має моди на частотах 1703 Гц (1` мода), 6103 Гц (3` мода), 12411 Гц(4` мода), 19897 Гц (5` мода). Загалом бачимо зміщення резонансних частот в напрямку збільшення частоти. Поки що значущих способів визначити, що це саме перфорація не помічено.

3.2.2 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 6мм

Друге дослідження (рис. 3.8) проводилося на моделі перфорації діаметром 6мм, яка зображена на рисунку 3.7.

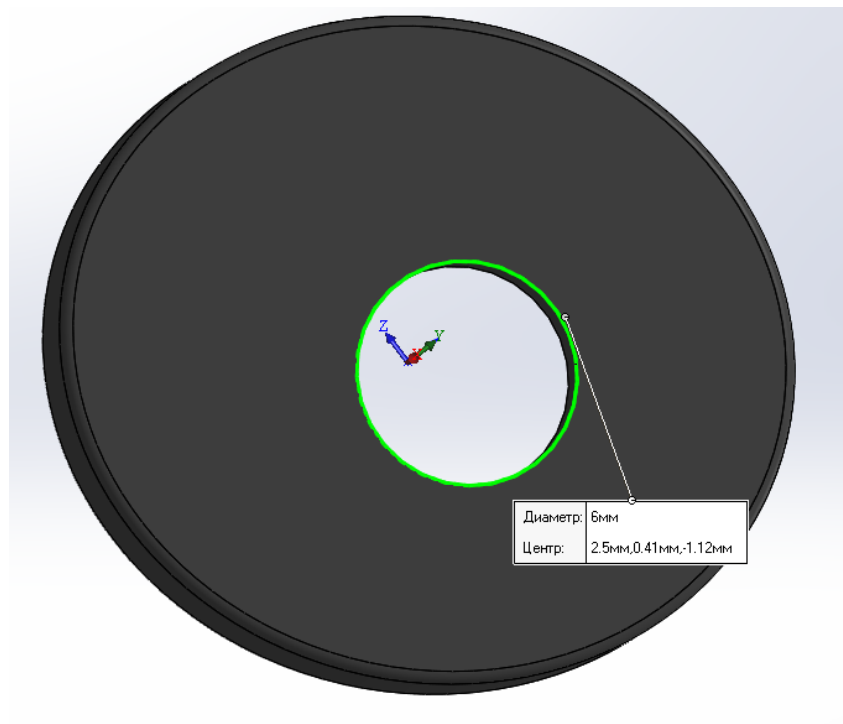


Рисунок 3.7 – Модель перфаророваної перетинки. Розмір отвору 6 мм

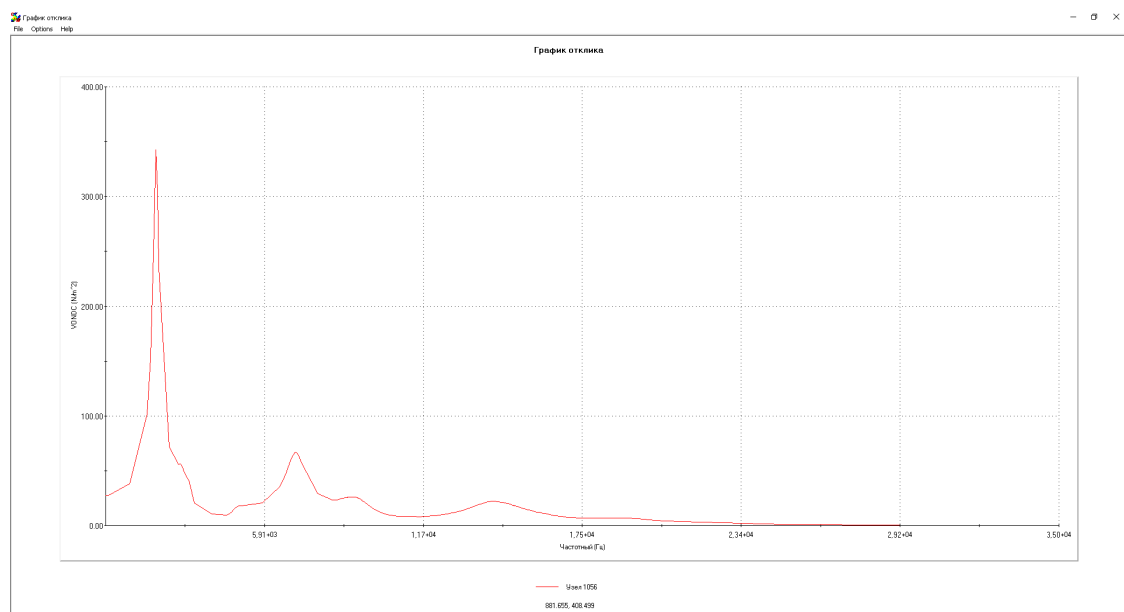


Рисунок 3.8 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Можна добре бачити, що 5 мода зникає. Частоти основних піків змістились ще раз. Маємо такі координати піків: 1861Гц, 343 Н/м² (1`` мода); 7086Гц, 66 Н/м² (3`` мода); 14271Гц, 23 Н/м² (4`` мода).

Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

БМ62.15.2505.1191

Лист

37

3.2.3 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 8мм

Після проведення наступного дослідження моделі перфорації з діаметром 8мм (рис. 3.9), отримуємо наступні результати на рисунку 3.10.

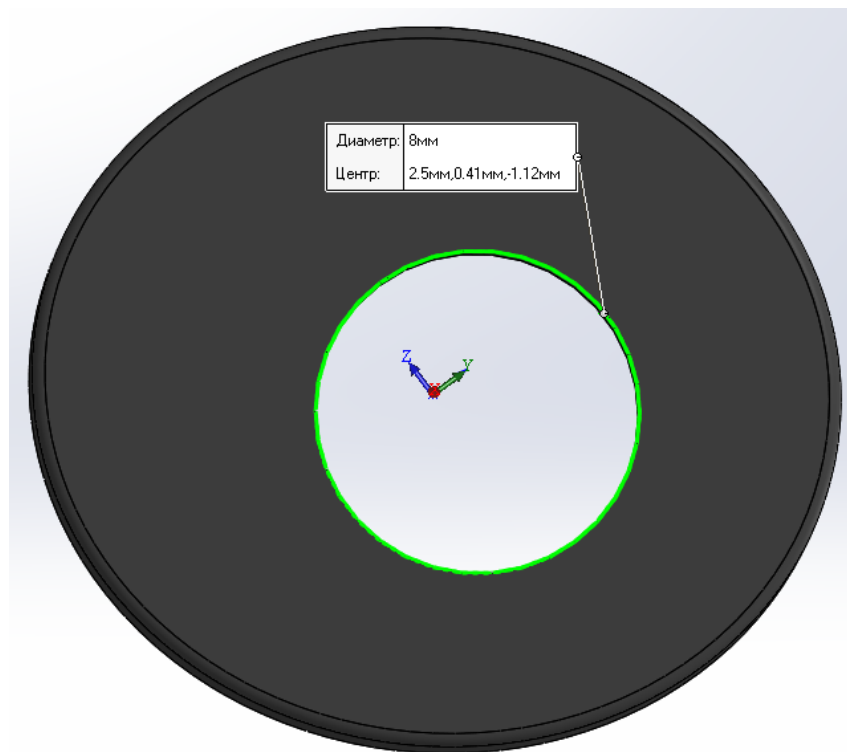


Рисунок 3.9 – Модель перфаророваної перетинки. Розмір отвору 8 мм

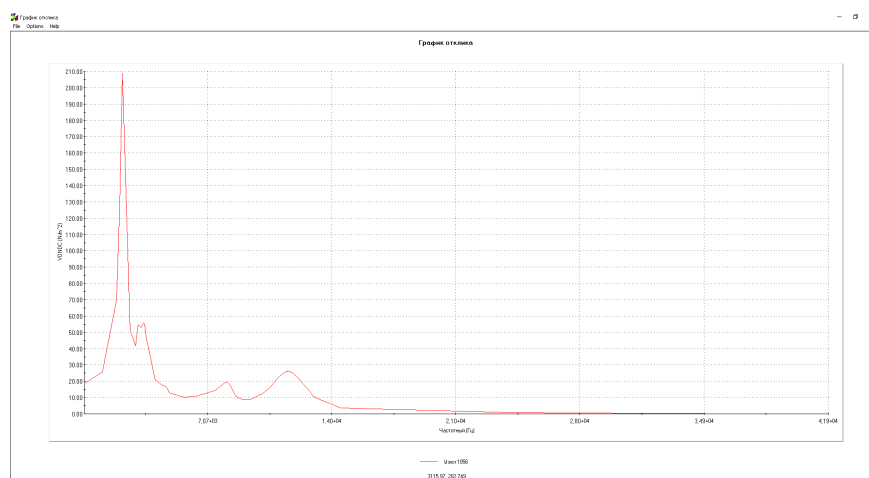


Рисунок 3.10 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

П'ятої моди помітити не можна, проте починає проявлятися нова – друга мода на частоті 3320 Гц 56Н/м². Ця мода може стати однією з характеристикних мод для перфорації барабанної перетинки. Параметри мод: 2248 Гц, 208Н/м²; 3320 Гц, 56Н/м²; 8116 Гц, 20 Н/м²; 11611 Гц, 26 Н/м².

3.2.4 Моделювання барабанної перетинки з отвором діаметру 10мм

Проводимо наступний аналіз перетинки, з отвором діаметроу 10мм, що зображена на рисунку 3.11.

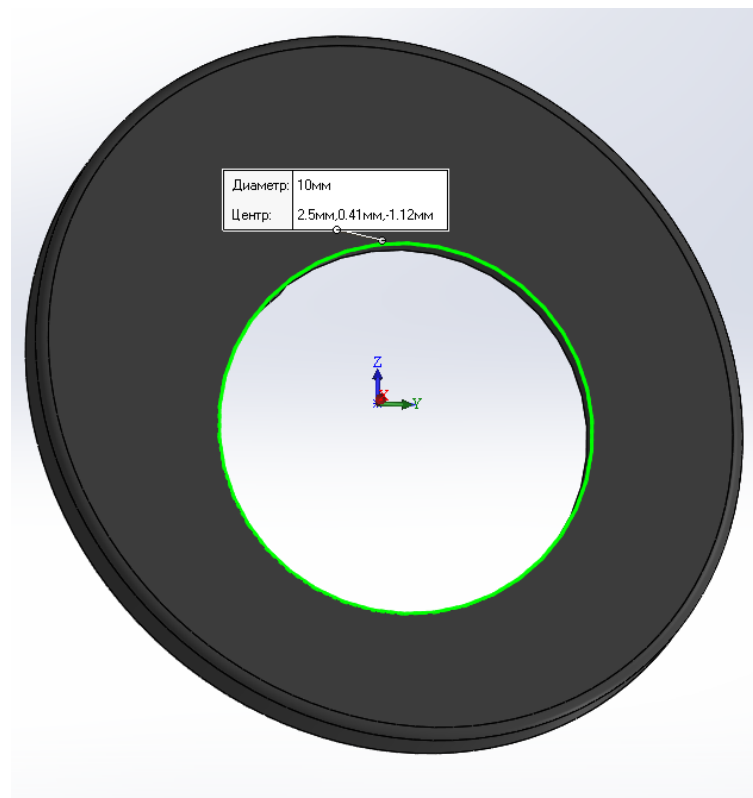


Рисунок 3.11 – Модель перфаророваної перетинки. Розмір отвору 10мм

Після аналізу отримуємо наступні результати (рис.3.12):

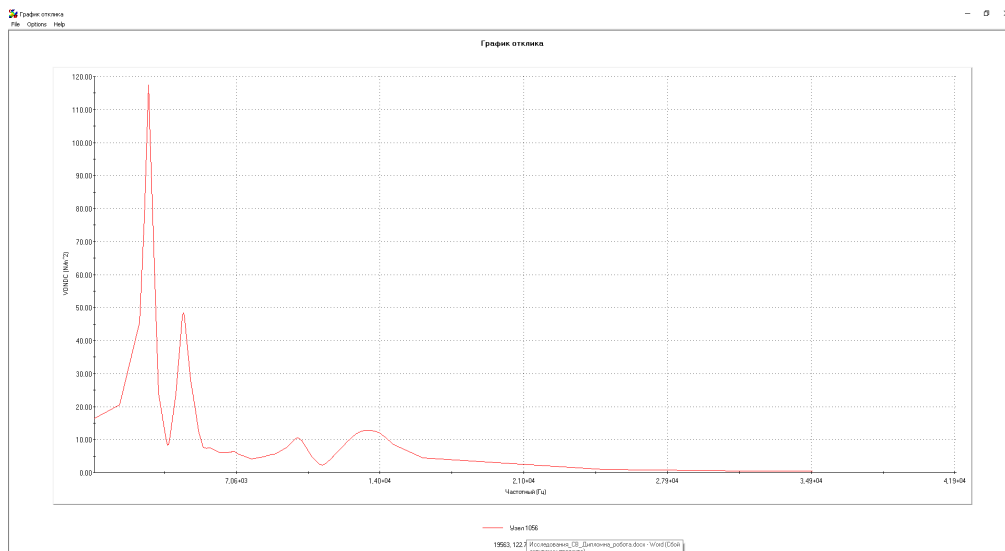


Рисунок 3.12 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Зсув частот посилюється ще більше. Друга мода ще більш виражена – має ще більшу амплітуду – на частоті 4444 Гц 50 Н/м^2 , при тому що головна мода має амплітуду 117 Н/м^2 . Цю моду використовуватимемо як характерну особливість для перфорації барабанної перетинки. Параметри інших мод: 2790 Гц, 117 Н/м^2 ; 4444 Гц, 50 Н/м^2 ; 10000 Гц, 10 Н/м^2 ; 13454 Гц, 13 Н/м^2 .

Загалом можна сказати, що при перфорації вуха характерною є друга мода на частотах 3-4 кГц. За її наявністю та видержаністю, а також за набором частот основних мод можна робити припущення про наявність патології та її ступеню.

Можна сказати, що для перфорації барабанної перетинки характерні такі ознаки: зсув частот в більш високочастотну область, збільшення впливу другої моди (3-4 кГц) та зменшення впливу п'ятої (19-20 кГц).

3.3 Моделювання барабанної перетинки з рубцями

3.3.1 Моделювання барабанної перетинки з рубцем витягнутої форми

Перший рубець має витягнуту форму – 14мм*1.4мм, товщина 1 мм (див. рис. 3.13).

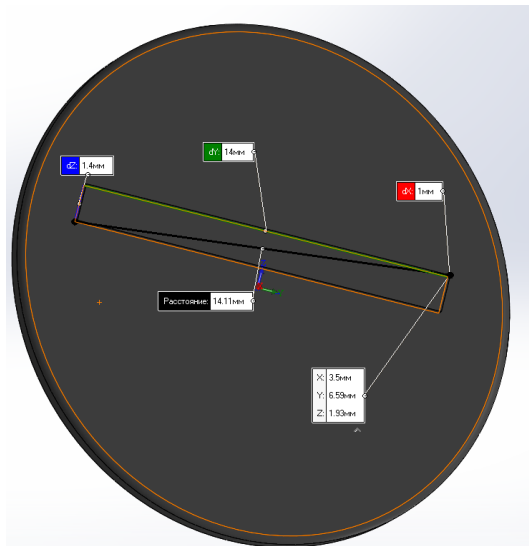


Рисунок 3.13 – Модель перетинки з рубцем витягнутої форми

Проводимо аналіз та отримуємо наступний результат (рис. 3.14):

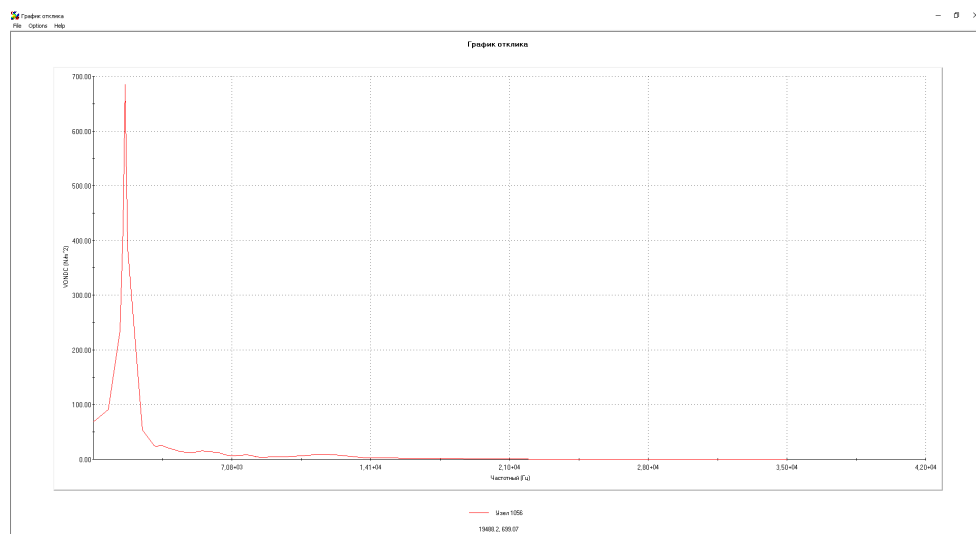


Рисунок 3.14 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Можемо спостерігати домінуюче положення однієї моди: 1702 Гц 687Н/м², тобто виражена тільки перша мода. Таке положення може стати одним з характерних для даного виду відхилень.

3.3.2 Моделювання барабанної перетинки з рубцем другого типу

Досліджуємо наступний вид БП з рубцем другого типу (рис. 3.15) та аналізуємо результати з рисунку 3.16.

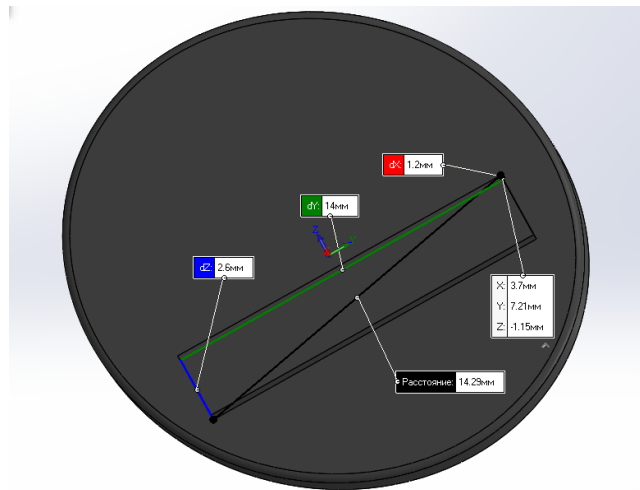


Рисунок 3.15 – Модель перетинки з рубцем другого типу

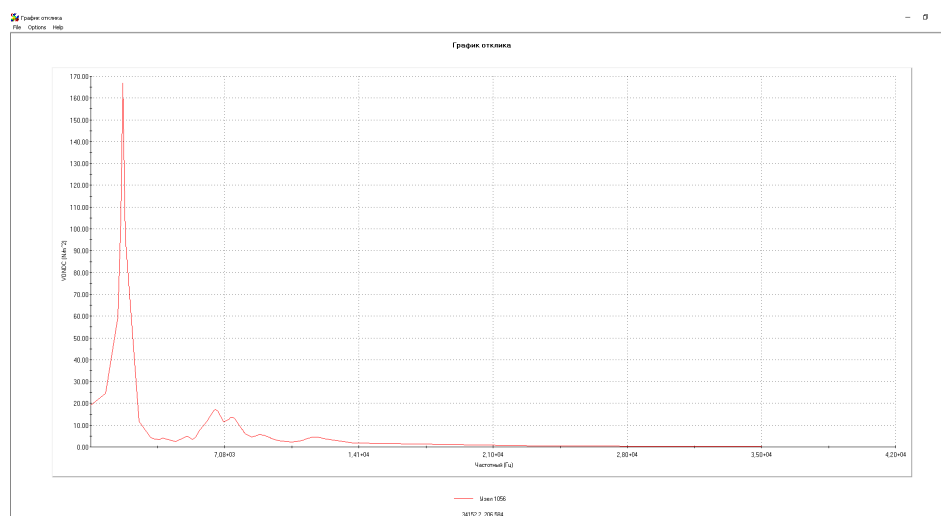


Рисунок 3.16 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Доволі явно починає виділятися третя мода на частоті близькій до 7 кГц. Координати мод: 1758 Гц 167 Н/м²(Мода 1), 6612 Гц 17 Н/м²(Мода 3) 7368 Гц 14 Н/м²(Мода 4), 11748 Гц 5 Н/м² (Мода 5). Зміщення частотних діапазонів відбувається не так швидко, як це було при перфорації.

3.3.3 Моделювання барабанної перетинки з рубцем третього типу

Продовжуємо досліджувати перетинки з рубцями, проводимо аналіз над мембраною з рубцем третього типу (рис. 3.17).

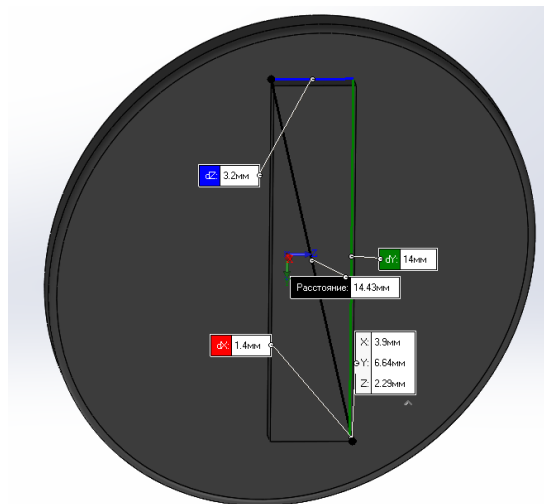


Рисунок 3.17 – Модель перетинки з рубцем третього типу

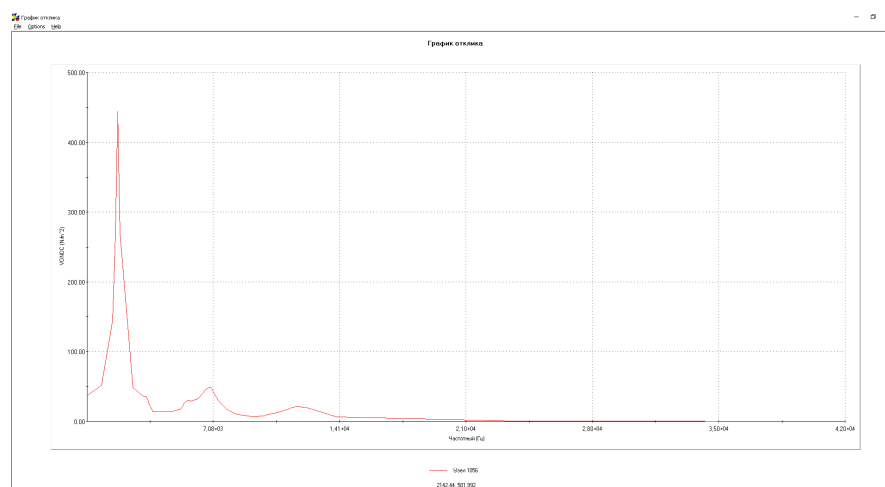


Рисунок 3.18 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

З рисунку 3.18 спостерігаються три основні моди, за наступними координатами: 1784 Гц 446 Н/м² (Мода 1) 6945 Гц 49 Н/м²(Мода 3), 11723 Гц 20 Н/м² (Мода4).

3.3.4 Моделювання барабанної перетинки з двома рубцями

Проводимо аналіз над перетинкою з трьома рубцями (рис. 3.19).

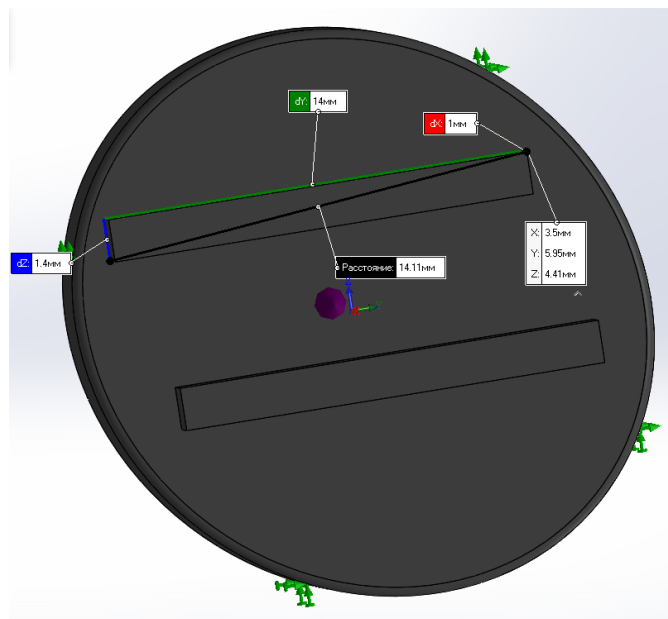


Рисунок 3.19 – Модель перетинки з двома рубцями

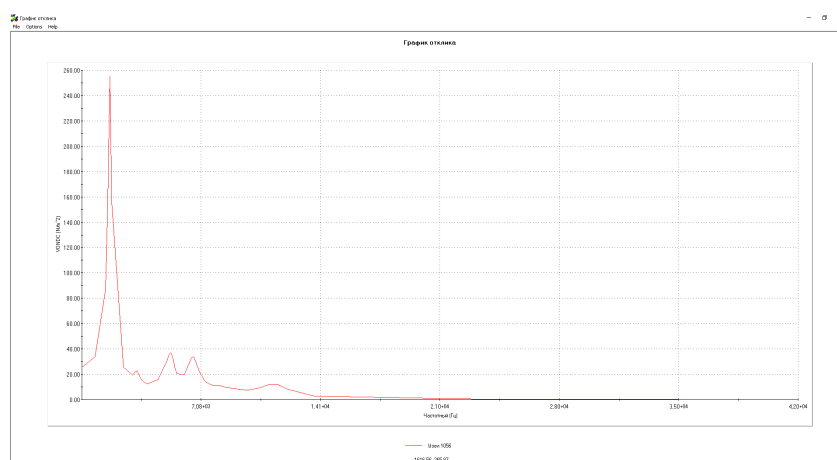


Рисунок 3.20 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

З рисунку 3.20 бачимо головні моди з координатами: 1756 Гц 254 Н/м², 3340 Гц 22 Н/м², 5308 Гц 37 Н/м², 6611 Гц 34 Н/м², 11312 Гц 12 Н/м².

При моделюванні двох рубців можна спостерігати яскраво виражений розкол 3-ї моди на частоти 5308 та 6611 Гц. Схоже, так роздвоєння частот відбулося через наявність паралельних рубців. 2-га мода починає бути помітною. Для перевірки гіпотези поєднаємо ці 2 рубці за допомогою третього та порівнюємо АЧХ.

3.3.5 Моделювання барабанної перетинки з трьома рубцями

Проводимо аналіз над перетинкою з трьома рубцями (рис. 3.21).

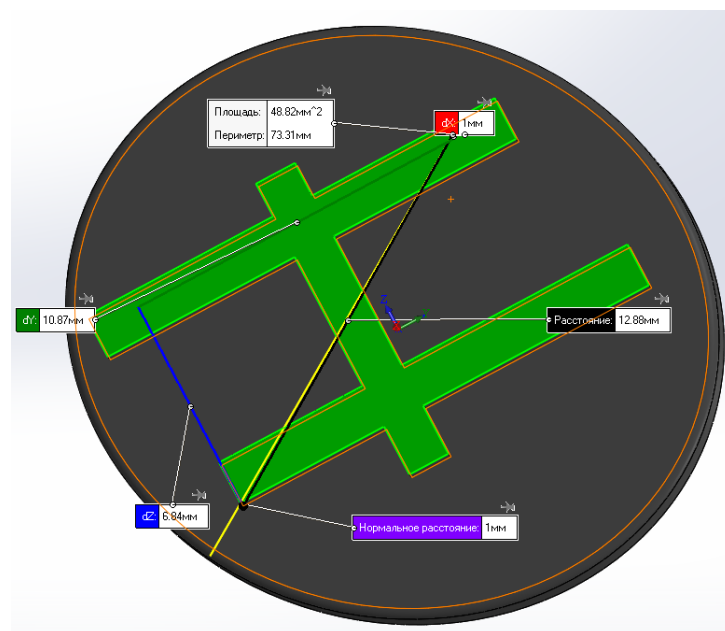


Рисунок 3.21 – Модель перетинки з трьома рубцями

Запускаємо аналіз та отримуємо наступні результати (рис 3.22):

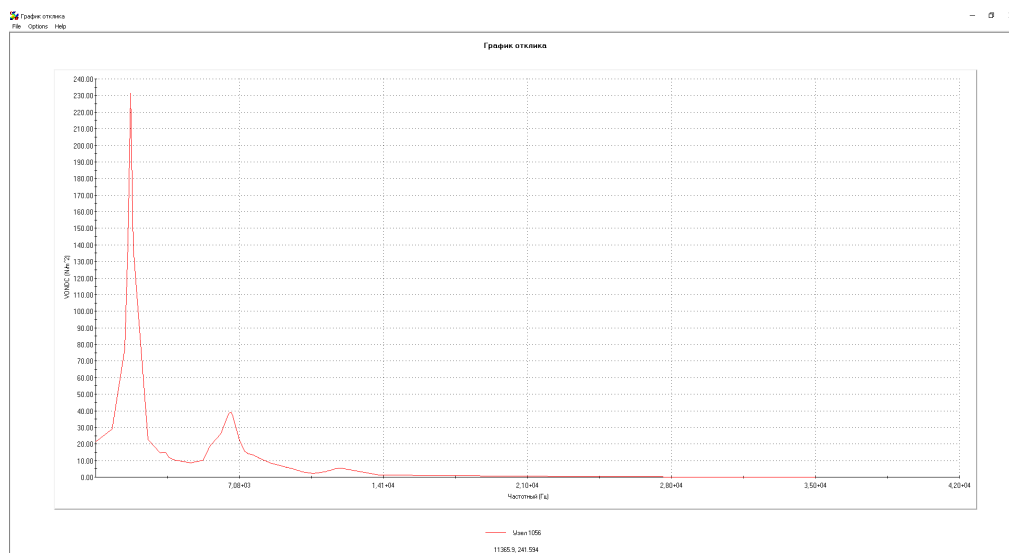


Рисунок 3.22 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Піки (моди): 1810 Гц 231 Н/м², 3445 Гц 14 Н/м², 6664 Гц 39 Н/м², 11953 Гц 5 Н/м².

Можемо спостерігаємо, що розкол частот 3-ї моди не відбувся, а маємо єдиний пік на частоті 6664 Гц порівняно більшої амплітуди, відносно першої моди.

Можемо сформулювати висновок по дослідженням мембрани з рубцями. Загалом можна сказати, що рубцювання проявляє себе як більш яскраве виділення перших, низькочастотних мод на фоні більш високочастотних. За деякої топології можуть змінюватися моди, розколюватися на підмоди, як це було показано на прикладі двох паралельних рубців та третьої моди.

3.4 Моделювання барабанної перетинки зі зміною товщини

3.4.1 Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.2мм

Будуємо модель перетинки з потовщенням 1.2мм (рис. 3.23) та запускаємо аналіз.

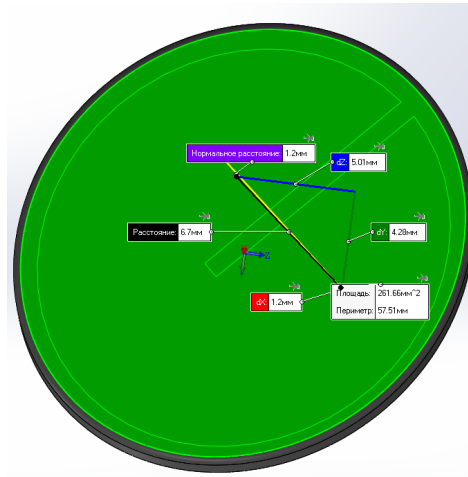


Рисунок 3.23 – Модель перетинки з потовщенням 1.2мм

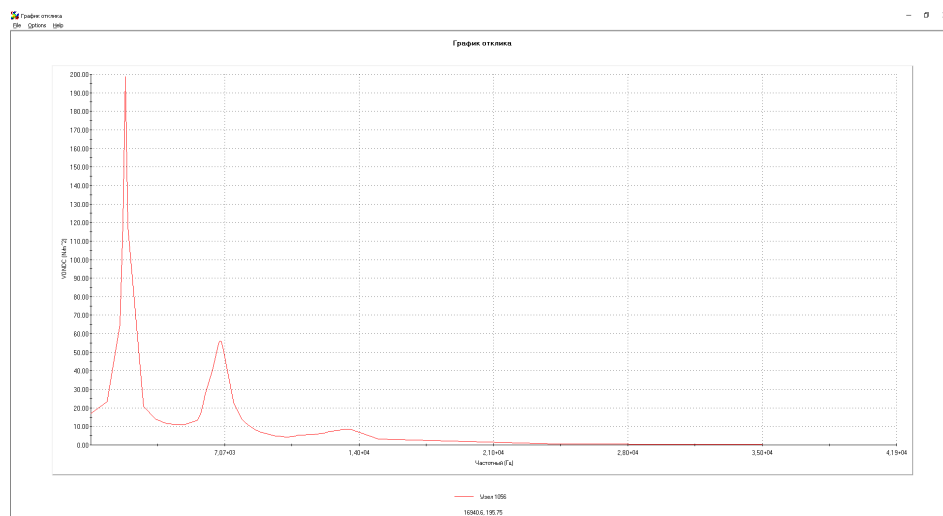


Рисунок 3.24 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Порівнюючи стовщення із нормою можна помітити зсув частот основних мод. Присутні 1,3,4 моди з координатами: 1920 Гц 198 Н/м², 6800 Гц 56 Н/м², 13568 Гц 9 Н/м².

3.4.2 Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.4мм

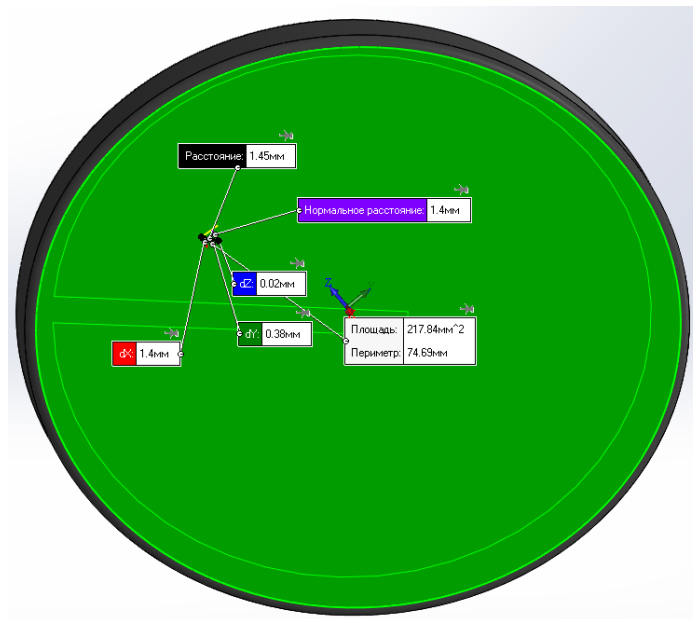


Рисунок 3.25 – Модель перетинки з потовщенням 1.4мм

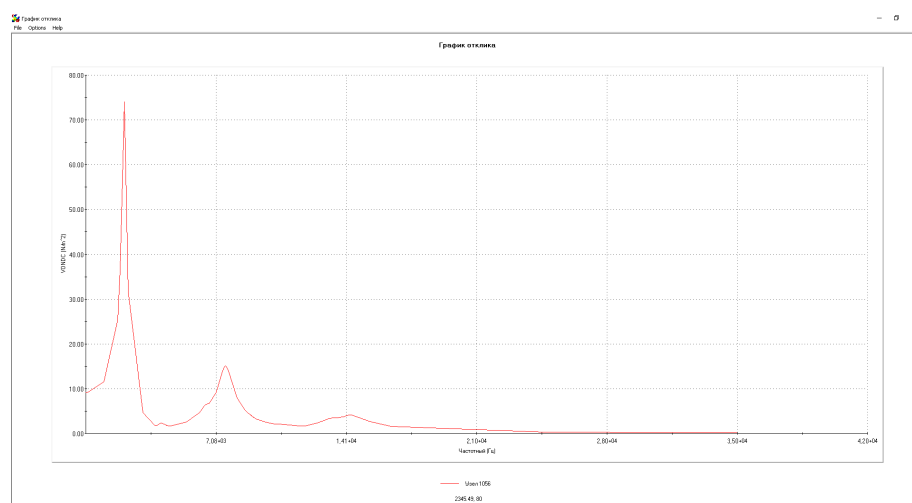


Рисунок 3.26 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Ще більше зміщення мод в область високих частот. Відсутня 2га та 5та моди. Моди: 2167 Гц 74 Н/м², 7567 Гц 15 Н/м², 14240 Гц 4 Н/м².

3.4.3 Моделювання барабанної перетинки з потовщенням 1.6мм

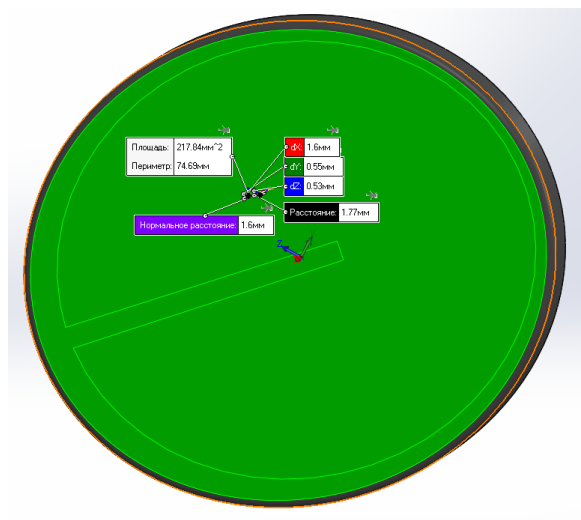


Рисунок 3.27 – Модель перетинки з потовщенням 1.6мм

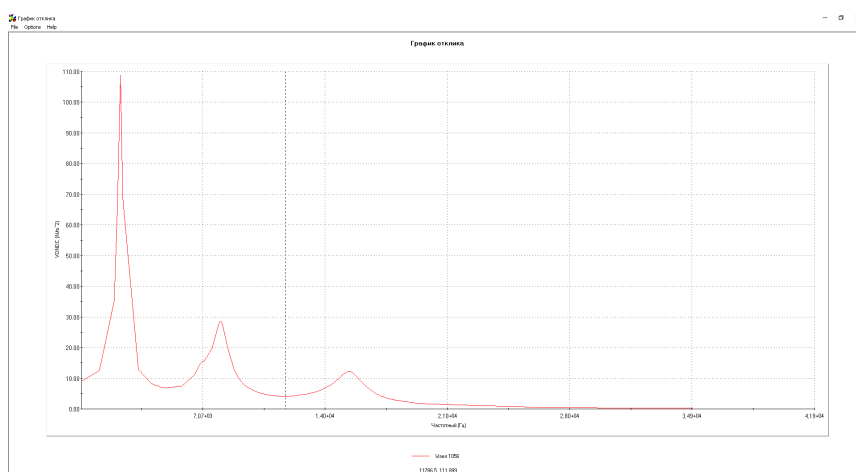


Рисунок 3.28 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Нові координати піків мод: 2380Гц 108 Н/м², 8064Гц 28 Н/м², 15421Гц 12 Н/м². Тенденція до зміщення частот зберігається. Спостерігаємо першу, третю та п'яту моди. Дуже схоже на те, що при збільшенні товщини мембрани тенденція буде зберігатись: частоти основних мод будуть зміщатись. Перевіримо чи зберігається тенденція при зменшенні товщини. Очікуємо зсув основних мод до області низьких частот.

3.4.4 Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.75мм

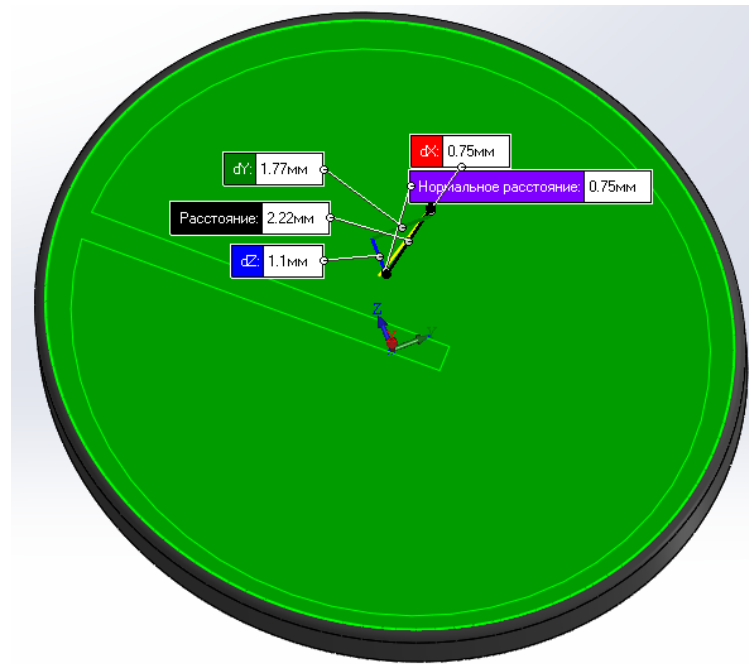


Рисунок 3.29 – Модель перетинки з утоншенням 0.75мм

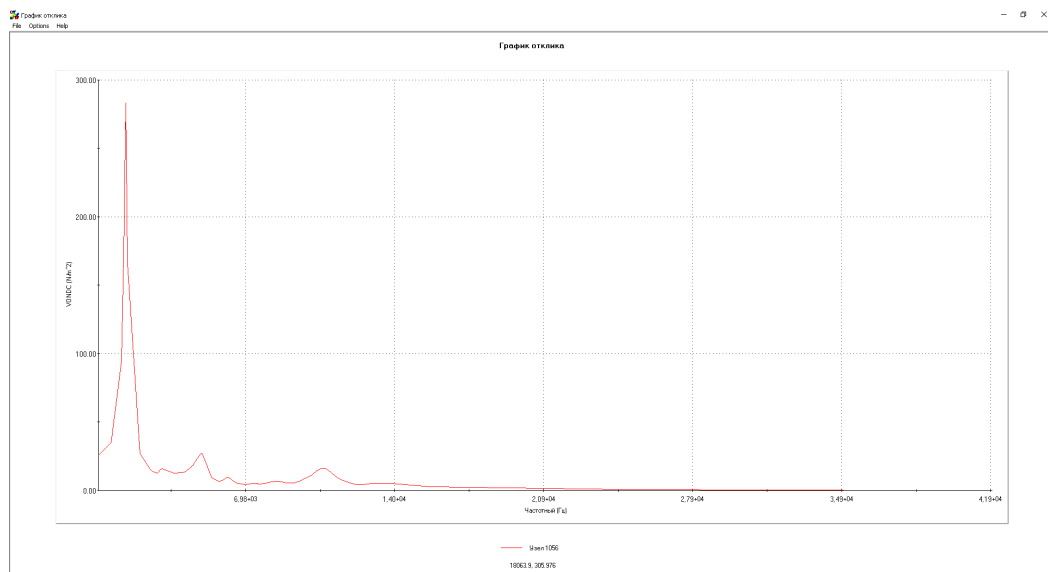


Рисунок 3.30 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Спостерігаємо що при зменшенні товщини зменшуються частоти. Координати мод: 1370Гц 284 Н/м², 4943Гц 28 Н/м², 10636Гц 17 Н/м². Отже, очікування щодо зміщення частот випардалось.

3.4.5 Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.5мм

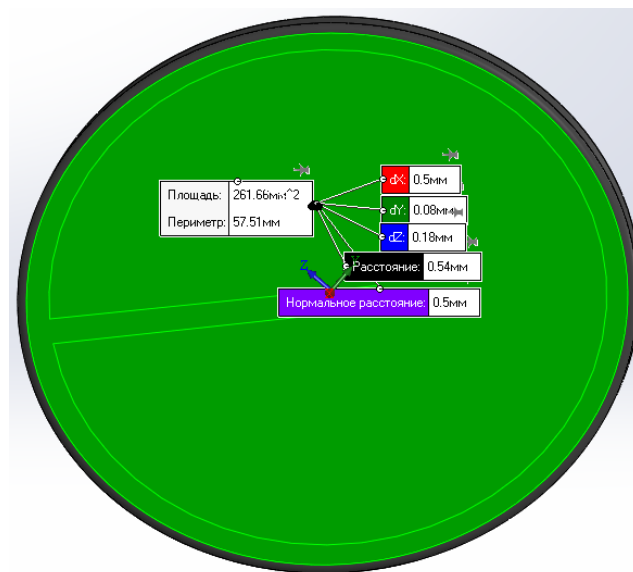


Рисунок 3.31 – Модель перетинки з утоншенням 0.5мм

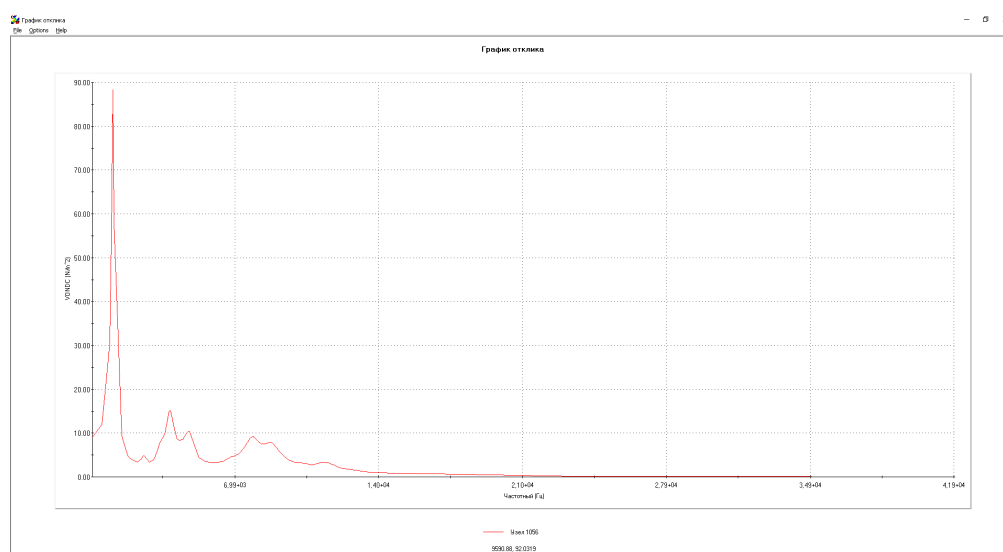


Рисунок 3.32 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Спостерігаємо не тільки зменшення частот, а і явний розкол четвертої та третьої моди. Можна помітити 2гу моду. 1091 Гц 88 Н/м², 2383 Гц 10 Н/м², 3788 Гц 15 Н/м², 7860 Гц 9 Н/м². Така поведінка може бути пояснена зменшенням впливу власного демпфування через зменшення маси перетинки. Піки загострюються.

3.4.6 Моделювання барабанної перетинки з утоншення 0.25мм

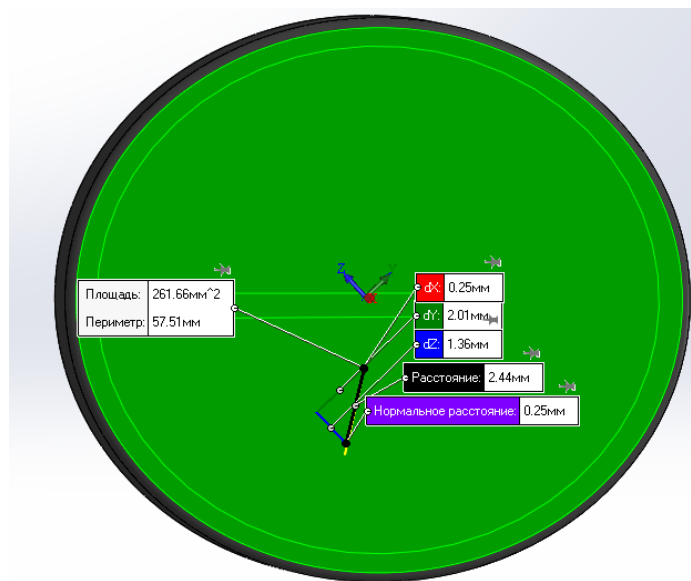


Рисунок 3.33 – Модель перетинки з утоншенням 0.25мм

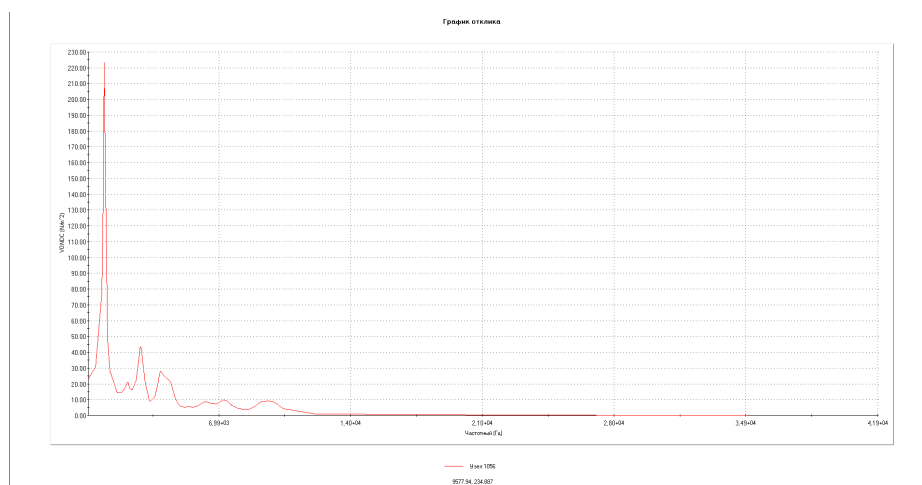


Рисунок 3.34 – Реакція системи на вплив вхідного сигналу по напрямку вздовж вхідного сигналу

Координати вершин піків: 906Гц 224 Н/м², 1620Гц 21 Н/м², 2799Гц 43 Н/м², 3873Гц 28 Н/м². Можна помітити, що при зменшенні товщини зменшуються амплітуди високочастотних мод. При сильному зменшенні товщини мембрани моди починають розколюватись, АЧХ отримує нові моди і взагалі має більш рваний вигляд.

3.4 Висновок до розділу 3

Отже, на основі моделювання вдалося встановити характерні ознаки для кожного з розглянутих виглядів патологій:

- при перфорації з'являється явно виражена друга мода та відбувається зсув до ВЧ;
- при рубцюванні збільшується вплив НЧ мод, відповідно зменшується ВЧ;
- при зміні товщини мембрани всі моди пропорційно змінюються. При достатньому стоншенні АЧХ стає більш гострою, з'являються нові підмоди та розколюються старі.

Таким чином маємо діагностичний критерій для кожного порушення. Більш детальні дослідження на барабанних перетинках різного діаметру дозволять побудувати універсальну модель, яка потенційно може указати не тільки на якісні, але і на кількісні зміни.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Головна мета розділу є виявлення та оцінка потенційно небезпечних і шкідливих факторів, що створюються конструкцією слухового апарату, та заходи їх усунення.

4.1 Характеристики об'єкту що проектується

4.1.1 Характеристики об'єкту

Спроекований прилад має закритий та переносний вид виконання. Клас виробу за способом захисту та ступенем захисту визначені згідно ДСТУ EN 61140:2015 «Захист проти ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання» та DIN EN 60529:2013 «Класи захисту оболонки виробу» відповідно. Прилад використовується для корекції порушень слуху пацієнта, методом слухопротезування. Технічні характеристики об'єкту вказані у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристики об'єкту

№	Найменування приладу та функціональних блоків	Основні характеристики	Кількість	Позиція на рисунку
1.	Слуховий апарат	Матеріал корпусу: пластик; Клас виробу за способом захисту – III; Клас виробу за ступенем захисту: B, IP43; Напруга: 1,45 В; Робочий струм: 1.2 мА; Діапазон частот: 100-7200 Гц; Максимальне підсилення звуку: 80 дБ; Температурний режим: -5 ...+45 °С.	1	-
2.	Живлення	Вид: ЗА, повітряно-цинкова батарея; Розмір: 312, PR41; Напруга: 1,45 В.	1	3

Продовження Таблиці 4.1

3.	Корпус приладу	Матеріал: пластик; Температурний режим -20...+120 °С.	1	5
4.	Динамік	Максимальне підсилення звуку: 80 дБ; Температурний режим: -5 ...+45 °С.	1	4

4.1.2 Складові частини об'єкту

Складові частини слухового апарату зображені на рис. 4.1.

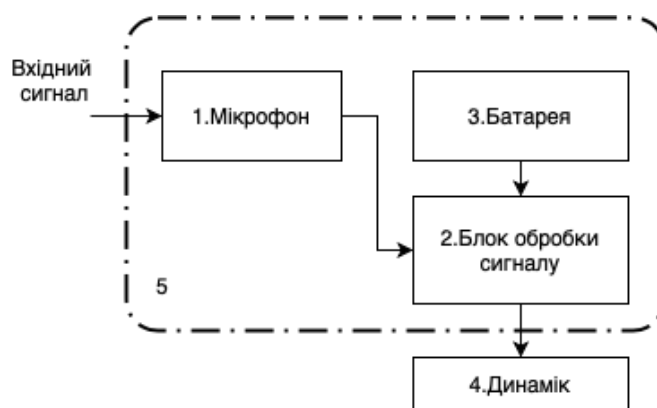


Рисунок 4.1 – Функціональна схема слухового апарату.

4.1.3 Характер взаємодії об'єкту в системі «людина – об'єкт»

Зважаючи на малу ємність батареї, а також малий розмір приладу, світлова індикація роботи відсутня. Джерела отримання інформації про роботу приладу та елементи керування представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Взаємодія об'єкту в системі «людина – об'єкт»

№	Найменування функціонального блока	Вид відображення інформації	кількість
1.	Блок регулювання гучності динаміка	Регулятор гучності	1
2.	Блок ввімкнення	Кнопка УТР1236-1	1

4.2 Оцінка потенційних небезпек що створюються конструкцією об'єкту, який проектується та заходи їх усунення

4.2.1 Фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Основною небезпекою слухового апарату є пошкодження слуху при недотриманні правил використання. Причини та наслідки наведені у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні джерела фізичних небезпечних і шкідливих виробничих факторів

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Блок обробки вхідного сигналу	Динамік	Високе підсилення вхідного звукового сигналу	Пошкодження внутрішнього вуха та барабанної перетинки

Порівняння реальних значень фізичних небезпечних і шкідливих факторів з їх нормативними представлено у табл 4.4.

Таблиця 4.4 – Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Максимальне підсилення звуку	80 дБ	110 дБ

Нормативні значення були приведені згідно ДСН 3.3.6.037-1999 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Для зменшення небезпеки впливу високого підсилення звукового сигналу запропоновано комплекс заходів у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Заходи з забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні заходи	Датчик автоматичного відключення	Екстренне вимкнення пристрою при різкій зміні звуку
		Запобіжник від високого рівня гучності	Зменшення максимальної гучності
2.	Організаційні заходи	Інструкція з експлуатації	Навчання з питань безпеки при експлуатації приладу
3.	Режимні	Продається лише після діагностики у лікаря	Обмежений доступ людям з хорошим слухом

Продовження Таблиці 4.5

4.	Експлуатаційні	Тест приладу після налаштування перед першим застосуванням	Персональні параметри роботи пристрою
5.	ЗІЗ	Не передбачені	

4.2.2 Небезпека враження людини електричним струмом

Причини та наслідки небезпеки враження людини електричним струмом, порівняння реальних та нормативних значень фактору небезпеки та заходи по уникненню враження електричним струмом приведені у табл. 4.6, 4.7, 4.8 відповідно.

Нормативні значення були приведені згідно ДСТУ 12.1.038:2008 «Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Гранично допустимі значення напруг дотику і струмів».

Таблиця 4.6 – Основні небезпеки електричного характеру

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Батарея, струмопровідні частини	Напруга	Пошкодження ізоляції	Ураження струмом, опіки

Таблиця 4.7 – Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Постійна напруга прямого контакту з тілом	1.45В	8В

Таблиця 4.8 – Заходи з забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні заходи	Ізоляція частин під напругою	Виключити контакт з частинами під напругою
2.	Організаційні заходи	Інструкція з експлуатації	Навчання з питань безпеки при експлуатації приладу
3.	Режимні	Не передбачені	
4.	Експлуатаційні	Технічний огляд, сервісне обслуговування	Безпечна робота з приладом.
5.	ЗІЗ	Не передбачені	

4.2.3 Біологічні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Через постійний контакт корпусу приладу зі шкірою людини виникає ризик біологічної небезпеки, а саме набряки та алергічні реакції через недотримання правил інструкції по застосуванню. Причини та наслідки небезпеки приведені у табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Основні небезпеки біологічних виробничих факторів

№	Найменування функціонального блоку	Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
1.	Корпус приладу	Мікроорганізми, віруси	Відсутність дезінфекції апарату	Місцеві алергічні реакції, набряк

Порівняння нормативних та реальних значень фактору біологічної небезпеки приведено у табл. 4.10. Нормативні значення були приведені згідно ДСТУ 7748:2015 «Безпека праці. Біологічна безпека. Загальні вимоги».

Для зменшення ризику небезпеки біологічних факторів запропоновано заходи з забезпечення охорони праці у табл. 4.11.

Таблиця 4.10 – Реальні та нормативні фактори небезпеки

№	Фактор небезпеки	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Мікроорганізми, віруси	Наявні	Відсутні

Таблиця 4.11 – Заходи з забезпечення охорони праці

№	Група номенклатурних заходів з ОП	Вид заходу	Критерій вибору
1.	Технічні заходи	Виготовлення корпусу приладу з безалергенного пластику	Усунення ризику виникнення алергії
2.	Організаційні заходи	Інструкція з експлуатації	Навчання з питань безпеки при експлуатації приладу
3.	Режимні	Не передбачені	
4.	Експлуатаційні	Дезинфекція приладу перед використанням	Виключення ситуації використання брудного приладу
5.	ЗІЗ	Дотримання правил власної гігієни	Індивідуальний захист

4.3 Розробка «Інструкції по техніці безпеки при експлуатації спроектованого приладу»

- 1) Перед використанням приладу обов'язково ознайомитись з інструкцією приладу;
- 2) Перед застосуванням клінічний інженер має індивідуально налаштувати пристрій для пацієнта;
- 3) Зберігати прилад у спеціальному футлярі, у сухому прохолодному місці;
- 4) Вимикати, коли ним не користуєтесь.
- 5) Уникати попадань прямих сонячних променів, води та високої температури;
- 6) Знімати пристрій при проходженні УЗІ, томографії, МРТ, рентгену та інших медичних процедур;
- 7) Уникати протирання апарату спиртом;
- 8) Не намагайтесь самостійно розібрати пристрій та полагодити його.
- 9) Перед застосуванням дезинфікувати антисептичним розчином з низьким вмістом спирту.

Висновок до розділу

У даному розділі було розглянуто та оцінено потенціо небезпечні і шкідливі виробничі фактори що створюються конструкцією слухового апарату, та заходи їх усунення. Основною небезпекою є елементи динаміка слухового апарату.

Було розроблено інструкцію по техніці безпеки при експлуатації спроектованого об'єкту.

ВИСНОВКИ

Робота присвячена пошуку способів діагностування порушень слухового аналізатора, пов'язаних зі зміною функціонального стану барабанної перетинки. Для виконання поставленої задачі були визначені геометричні параметри барабанної перетинки та механічні параметри тканин, з яких складається перетинка.

На основі отриманих даних в середовищі SolidWorks побудував модель барабанної перетинки. Далі за допомогою модулю частотного моделювання визначив потенційні моди коливань. На основі частотного аналізу за допомогою модулю гармонічного аналізу побудував АЧХ у барабанної перетинки у нормі. З отриманих резонансних частот виділив основні моди, які шукав в АЧХ у подальшому дослідженні.

Дослідження перфорованої моделі вуха показало, що при перфорації вуха характерною є друга мода на частотах 3-4 кГц. За її наявністю та видержаністю, а також за набором частот основних мод можна робити припущення про наявність патології та її ступеню. А також зроблений висновок, що для перфорації барабанної перетинки характерні такі ознаки: зсув частот в більш високочастотну область, збільшення впливу другої моди (3-4кГц) та зменшення впливу п'ятої (19-20 кГц).

При рубцюванні було визначено, що збільшується вплив НЧ мод, відповідно зменшується ВЧ.

При достатньому стоншенні барабанної перетинки АЧХ стає більш гострою, з'являються нові підмоди та розколюються старі.

У всіх дослідженнях отримано діагностичний критерій, тому є сенс проводити дослідження на барабанних перетинках різного діаметру дозволять побудувати універсальну модель, яка потенційно може указати не тільки на якісні, але і на кількісні зміни.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Наружное ухо: строение, функции и возрастные особенности. [Электронный ресурс], <https://studfile.net/>– Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7901194/> – Дата доступа: 20.05.2020
2. Слуховий аналізатор: загальна характеристика. Реферат. [Электронный ресурс], <http://ru.osvita.ua/>– Режим доступа: <http://ru.osvita.ua/vnz/reports/biolog/26024/print/> Дата доступа: 20.05.2020
3. Л.И. Руленкова, О.И. Смирнова. Аудиология и слухопротезирование: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 208 с.
4. Л.В. Нейман, М.Р. Богомильский. Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи: Учеб. для студ. высш. пед. учеб. заведений / Под ред. В.И. Селиверстова. - М.: ВЛАДОС, 2001. – 224 с.
5. Боярчук Е.Д., Виноградов А.А., Шейко В.И., Виноградов О.А. Анатомия, физиология и патология органа слуха : учебное пособие для студентов высших учебных заведений (пробный вариант). – Луганск: Альма-матер, 2007. – 89 с.
6. Руководство для слухопротезистов / под ред. И. Божидара Лятковского. – Лодзь: ГЕЕРС, 2002. – 250 с.
7. Барабанная полость. Анатомия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://for-medic.info/2011/02/barabannaya-polost/>
8. Sahley Tony L. Basic Fundamentals in Hearing Science / Tony L. Sahley, Frank E. Musiek. – San Diego: Plural Publishing, 2014. – 686 p. ISBN: 9781597565493.
9. Будова вуха. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://8next.com/bl/3938-bl_067.html

10. Зубченко О.А. Широкополосный аудиологический скрининг слуха человека // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – 2016. с. 10-79.

11. Барабана перепонка. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://гдб26.пф/gorlo/что-такое-barabannaya-pereponka.html>

12. Черкасова В.Г. Головацького А. С. Анатомія людини

13. Зовнішній слуховий прохід. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/1225383/page:2/>

14. Бардин Б. С. О нелинейных колебаниях гамильтоновой системы в случае резонанса четвертого порядка // Нелинейная динамика. 2007. Т. 3, X2 1. С. 57.

15. Види і приклади резонансу. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.poznavayka.org/uk/fizika-uk/rezonans-yogo-znachennya-u-fizitsi-prichini-i-prikladi-yavishha/#a3>

16. Функції нервової системи. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://marriott-aurora.ru/uk/pravila-vyezda/nervnaya-sistema-vypolnyaet-sleduyushchie-funkcii-test-nervnaya-sistema-docx--/>

17. Пошкодження слухових кісточок. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://medincus.volyn.ua/poskodzenna-sluhovih-kistocok.html>

18. Отит – запалення середнього, зовнішнього і внутрішнього вуха. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://lorclinika-ufa.ru/otit/>

19. DENGА [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступа: <http://analizator.ucoz.ru/index/0-7> (дата звернення 27.04.2020) – Слуховой анализатор.

20. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований [Электронный ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступа: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6869> (дата звернення 21.04.2020) – Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем.

21. Гапанович В. Я., Александров В. М. Оториноларингологический атлас. — Минск: «Высшая школа», 1989.

					БМ62.15.2505.1191	Лист
						62
Вим.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		

22. Анатомія людини: У 2 т. — К.: Здоров'я, 2005. — Т. 2. — 372 с.

23. Pedlib.ru [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: http://pedlib.ru/Books/1/0330/1_0330-22.shtml#book_page_top (дата звернення 21.04.2020) – Анатомия, физиология и патология органов слуха и речи: Учеб. для студ. высш. пед. учеб. заведений

24. ISICAD [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Режим доступу: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18820 (дата звернення 28.04.2020) – SolidWorks 2017: в жизни всегда есть место новому;

25. SOLIDWORKS 2018. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: https://help.solidworks.com/2018/russian/WhatsNew/c_topology_optimization_plate.htm (дата звернення 4.05.2020) – Новые возможности SOLIDWORKS 2018